



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**ROZŠÍŘENÍ 3D TISKÁRNY O SPECIÁLNÍ TISKOVOU
HLAVU**

EXTENSION OF THE 3D PRINTERS FOR SPECIAL PRINT HEAD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matúš Helienek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Bradáč, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Matúš Helienek**
Studijní program: Výrobní systémy
Studijní obor: Výrobní systémy
Vedoucí práce: **Ing. František Bradáč, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Rozšíření 3D tiskárny o speciální tiskovou hlavu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem je návrh multifunkční vyhřívané 3D tiskové hlavy (pro kombinaci tiskových materiálů a barevných odstínů) a její kombinace s obráběcím vřetenem pro třískové obrábění

Cíle diplomové práce:

1. Provedte rešerši některých možných kombinací 3D tiskových hlav s obráběcím vřetenem a rešerši tiskových hlav pro kombinaci různých průměrů a barev podávaného materiálu za účelem jejich mixování.
2. Na základě systémové analýzy jednotlivých variant provedte výběr vhodné varianty.
3. Provedte pevnostní výpočty, výpočty jednotlivých pohonů a výkonů vyhřívání hot endu.
4. Vytvořte 3D konstrukční návrh hlavy vybrané varianty.
5. Vytvořte výkresy sestavy a výrobní výkresy vybraných částí.
6. Navrhněte elektroschéma zapojení vybrané varianty a navrhněte program pro řízení.

Seznam doporučené literatury:

SMC Worldwide leading experts in pneumatics [online]. 2016. Vitoria (Alava), Spain: SMC [cit. 2016-11-20]. Dostupné z:

https://www.smc.eu/portal_ssl/WebContent/main/index_restyling.jsp?is_main=yes&lang=en&ctry=EU

Beckhoff Information System [online]. 2016. Verl, Germany: Beckhoff Automation GmbH & Co. KG [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: http://infosys.beckhoff.com/index_en.htm

BECKHOFF New Automation Technology [online]. 2016. Verl, Germany: Beckhoff Automation GmbH & Co. KG [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.beckhoff.com/>

Mechatronic Systems Simulation Modeling and Control [online]. 2010. Rijeka, Croatia: IN TECH d.o.o [cit. 2016-11-20]. ISBN 978-953-307-041-4. Dostupné z:
<http://www.intechopen.com/books/mechatronic-systems-simulation-modeling-and-control>

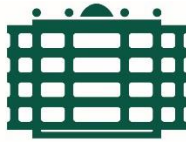
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Aufgabenstellung Diplomarbeit

Institution: Technische Universität Chemnitz, Fakultät Maschinenbau
Professur Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

Student: **Bc. Matúš Helienek**

Studiengang: Masterstudiengang Produktionssysteme

Betreuer: **Ing. František Bradáč, Ph.D. (VUT FSI Brno)**
Dr.-Ing. Thomas Hänel (TU Chemnitz)

Akademisches Jahr: 2016/17

Thema: **Erweiterung eines 3D-Druckers um einen multifunktionalen Druckkopf**

Aufgabenstellung:

Die Aufgabe beinhaltet den Entwurf eines multifunktionalen beheizten 3D-Druckkopfes (Extrusionsverfahren) für die Kombination von verschiedenen Druckmaterialien sowie Multicolorextrusion. Des Weiteren soll der Druckkopf mit einer Bearbeitungsspindel für die Spanbearbeitung erweitert werden, mit dem Ziel die Oberfläche der 3D-gedruckten Bauteile zu verbessern.

Schwerpunkte:

1. Recherche möglicher Kombinationen von 3D-Druckköpfen mit einer Bearbeitungsspindel (spanende Verfahren, z.B. Fräsen) sowie die Recherche bzgl. Druckköpfen für die Kombination verschiedener Filamentdurchmesser, Materialien und Farben.
2. Ermittlung der Anforderungskriterien für einen 3D-Druckkopf für das Extrusionsverfahren (Fördermechanismus für die Materialzuführung, Mischkammer und Düse), Entwurf und Analyse verschiedener Varianten sowie Auswahl der geeigneten Variante.
3. Berechnungen der einzelnen Antriebe sowie der Heizleistung des Hot Ends.
4. Erstellung eines 3D-Konstruktionsentwurf für den 3D-Druckkopf der ausgewählten Variante.
5. Erstellung einer technischen Zusammenbauzeichnung, sowie Einzelteilzeichnungen für die Fertigung der 3D-Druckkopfkomponenten.
6. Entwurf eines Schematas für die Steuerung und Schaltung der ausgewählten Variante sowie Entwurf für eine Steuerungssoftware.

Der Abgabetermin der Diplomarbeit ist durch den Zeitplan des Akademischen Jahres 2016/2017 festgesetzt.

Chemnitz, den 25.01.2017

Prof. Dr.-Ing- Andreas Hirsch

ABSTRAKT

Témou tejto práce je rozšírenie 3D manipulátora, ktorý slúži na 3D tlač. Jeho vylepšenie sa týka novej tlačiacej hlavy, ktorá bude schopná dosiahnuť rôzne farebné odtiene pri mixovaní až troch materiálov. Zariadenie je ďalej rozšírené o frézovanie ako dokončovací proces, ktorý má za úlohu zvýšiť kvalitu povrchu vytlačeného objektu.

ABSTRACT

This thesis deals with improvement of 3D-manipulator which is currently used for 3D printing. The improvement involves adding a new printer head which will be able to acquire various colors by mixing up to three materials. Furthermore, device is extended with milling as a finishing process responsible for better surface quality of printed object.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Rozšírenie 3D manipulátora, multi materiálková tlačiacia hlava, farebná 3D tlač, úprava povrchu vytlačeného objektu

KEYWORDS

Improvement of 3D-manipulator, multi material 3D printer head, full-color 3D printing, surface adjustment of printed object

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

HELIENEK, M. *Rozšíření 3D tiskárny o speciální tiskovou hlavu*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2017, 87 s., Vedoucí diplomové práce Ing. František Bradáč, Ph.D..

POĎAKOVANIE

Moje poďakovanie patrí Ing. Františkovi Bradáčovi, Ph.D. za ochotný prístup a odbornú pomoc, ktorú mi poskytol počas vypracovávania tejto diplomovej práce. Ďalej by som rád poďakoval všetkým, ktorí ma podporovali, poradili mi alebo iným spôsobom prispeli k tvorbe tejto práce.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, vypracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Františka Bradáča, Ph.D. a s použitím literatúry, ktorá je uvedená v zozname.

V Brne dňa 25. 5. 2017

.....

Helienek Matúš

OBSAH

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD | 15 |
| 2 | MOTIVÁCIA..... | 16 |
| 3 | PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA..... | 17 |
| 3.1 | Význam 3D tlače ako výrobnéj technológie | 17 |
| 3.1.1 | Vývoj v oblasti 3D tlače | 17 |
| 3.1.2 | Súčasná aplikácie 3D tlače | 18 |
| 3.1.3 | Budúcnosť 3D tlače | 19 |
| 3.2 | Klasifikácia technológií 3D tlačiarňí | 20 |
| 3.2.1 | Technológia SLA (Stereolithography Apparatus) | 21 |
| 3.2.2 | Technológia SLS (Selective Laser Sintering) | 22 |
| 3.2.3 | Technológia FDM (Fused Deposition Modeling) | 23 |
| 3.3 | Materiály pre 3D tlačiarne typu FDM | 24 |
| 3.3.1 | ABS | 24 |
| 3.3.2 | PLA..... | 24 |
| 3.3.3 | Nylon | 24 |
| 3.3.4 | Iné materiály | 25 |
| 3.4 | Špecializované 3D tlačiarne typu FDM..... | 26 |
| 3.4.1 | Multi materiálové 3D tlačiarne..... | 26 |
| 3.4.2 | Hybridné 3D tlačiarne s obrábacou funkciou | 29 |
| 4 | CIELE DIPLOMOVEJ PRÁCE..... | 31 |
| 4.1 | Definícia požiadaviek na rozšírenie..... | 31 |
| 4.2 | Rozbor komponentov pôvodného zariadenia | 31 |
| 5 | KONŠTRUKČNÝ ROZBOR | 35 |
| 5.1 | Návrhy prestavby | 35 |
| 5.1.1 | Prevedenie s revolverovou hlavou..... | 35 |
| 5.1.2 | Prevedenie s automatickou výmenou nástrojov | 36 |
| 5.1.3 | Prevedenie s dvojitou osou X a Z – spojené osi Z..... | 36 |
| 5.1.4 | Prevedenie s dvojitou osou X a Z – samostatné osi Z | 37 |
| 5.1.5 | Systémová analýza konštrukčného usporiadania | 38 |
| 5.2 | Pôvodné diely manipulátora | 40 |
| 6 | VÝPOČTOVÁ DOKUMENTÁCIA..... | 41 |
| 6.1 | Výpočet osi Z – frézovacia činnosť | 41 |
| 6.1.1 | Rezné sily a parametre frézovania | 41 |
| 6.1.2 | Kontrola pohonu osi Z..... | 43 |
| 6.1.3 | Pevnostný výpočet osi Z..... | 46 |
| 6.2 | Výpočet osi Y | 47 |
| 6.2.1 | Kontrola pohonu osi Y | 47 |
| 6.2.2 | Kontrola nového pohonu osi Y..... | 51 |
| 6.2.3 | Pevnostný výpočet osi Y | 54 |
| 6.3 | Výpočet osi X | 56 |
| 6.3.1 | Kontrola pohonu osi X | 56 |
| 6.3.2 | Pevnostný výpočet osi X | 60 |
| 7 | ROZŠIRUJÚCE KOMPONENTY..... | 62 |
| 7.1 | Nové vedenie osi X..... | 62 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7.2 | Náhradné vedenie osi Y | 62 |
| 7.3 | Nová os Z | 63 |
| 7.4 | Nový motor vedenia X | 63 |
| 7.5 | Tlačiaci systém | 63 |
| 7.5.1 | Tlačiaci hlava | 63 |
| 7.5.2 | Krokové motory | 64 |
| 7.5.3 | Zásobník | 65 |
| 7.6 | Vyhrievaná podložka | 65 |
| 7.7 | Elektrovreteno | 65 |
| 7.8 | Finálna podoba 3D tlačiarne | 66 |
| 8 | ELEKTRONIKA A RIADENIE | 67 |
| 8.1 | Základný hardware | 67 |
| 8.2 | Servo drivery | 69 |
| 8.3 | EtherCAT Bus Coupler | 69 |
| 8.3.1 | Terminál KL 2541 | 70 |
| 8.3.2 | Terminál KL 2408 | 70 |
| 8.3.3 | Terminál KL 3408 | 70 |
| 8.3.4 | Terminál KL 4002 | 71 |
| 8.4 | Ovládanie elektrovretena BLDC-DZZ | 71 |
| 8.5 | Výkon zdrojov | 72 |
| 8.6 | Software pre riadenie | 72 |
| 9 | ZÁVER | 74 |
| 10 | ZUSAMMENFASSUNG | 75 |
| 11 | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 76 |
| 12 | ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK | 79 |
| 12.1 | Zoznam tabuliek | 79 |
| 12.2 | Zoznam obrázkov | 79 |
| 12.3 | Zoznam použitých skratiek a symbolov | 81 |
| 13 | ZOZNAM PRÍLOH | 85 |

1 ÚVOD

Teoretická časť diplomovej práce sa zaoberá aditívnym spôsobom výroby – 3D tlačou, ktorá v súčasnosti objavuje vo svete stále väčšiu popularitu. Jej rozvoj je spätý so snahou navrhnuť zariadenie, ktoré bude schopné vyrobiť ľubovoľný tvar výrobku s použitím širokého množstva materiálov – od rôznych zliatin kovu cez plast až po použitie organických látok. O vytvorenie univerzálneho výrobného zariadenia sa usilujú tri základné technológie 3D tlače. Táto práca sa predovšetkým zaujíma o technológiu FDM, ktorá je z nich najviac rozšírená pre osobné použitie a to z dôvodu nízkych nákladov na zaobstaranie a prevádzku. Rešeršná časť je preto venovaná skúmaniu ich vlastností a dostupných rozširujúcich komponentov, s ktorými bude užívateľ schopný doceliť viacfarebnosť a vyššiu kvalitu povrchu vytlačeného objektu.

Hlavnou problematikou praktickej časti diplomovej práce je rozšírenie laboratórneho manipulátora, ktorý z počiatku slúžil ako 3D gravírovacia frézka a neskôr bol upravený na 3D tlačiareň technológie FDM. Na základe poznatkov z teoretickej časti bude na tomto stroji vykonaná nová prestavba, ktorá tentokrát zahŕňa nahradenie tlačiacej hlavy a rozšírenie o frézovaciu funkciu. Výsledný výrobný proces bude teda možné rozdeliť na dve fázy. V prvej fáze bude prebiehať 3D tlač pomocou novej tlačiacej hlavy, ktorej úlohou bude dosiahnutie mixovania až troch rôznych materiálov, čo umožní výrobu farebných objektov. Druhá fáza je charakterizovaná ako dokončovací proces, pri ktorom sa frézovaním upraví kvalita povrchu vytlačeného objektu.

2 MOTIVÁCIA

Motivácia tejto diplomovej práce je založená na fascinujúcej myšlienke, ktorú už vyslovil nejaký vizionár. 3D tlač ako výrobný proces má veľkú šancu spôsobiť novú technologickú revolúciu tým, že postupne nahradí konvenčné obrábacie procesy v tvarovej a materiálovej rozmanitosti a to nielen vo výrobných halách ale aj v domácnostiach bežných nadšencov. Aby sa táto trúfalá vízia jedného dňa naplnila, rozhodol som sa, že svojou diplomovou prácou prispem k rozšíreniu znalostí v tejto oblasti. Technológia 3D tlače je stále vo vývine a pochopiteľne má pred sebou ešte mnoho prekážok, ktoré musí prekonať. Na druhej strane ponúka množstvo možností, ako sa v nej môže niekto presadiť, vymyslieť niečo nové a spomínané prekážky prijať ako výzvy. Preto, ak by mala moja práca aj okrem iného inšpirovať druhých k podobným projektom, môžem prehlásiť, že splnila ďalší svoj účel.

3 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Úvodná kapitola zoznamuje čitateľa so všeobecnými znalosťami 3D tlače, ktoré mu budú nápomocné k pochopeniu cieľov diplomovej práce. Obsahuje prehľad historického vývinu, súčasných znalostí s náhľadom do budúcnosti a rozdelenie technológie 3D tlače medzi tri hlavné kategórie. Na záver je zameraná na získanie znalostí, ktoré sú kľúčové pre ďalšie pokračovanie v navrhovaní konečnej podoby rozširovaného zariadenia.

3.1 Význam 3D tlače ako výrobnej technológie

Konečná podoba výrobku sa dá v dnešnej priemyselnej výrobe dosiahnuť dvoma spôsobmi: substraktívnym alebo aditívnym. Substraktívny spôsob je založený na postupnom odoberaní materiálu zo vstupného polotovaru a je využívaný najmä konvenčnými obrábacími procesmi ako napr. sústruženie, frézovanie... Napriek tomu, že je tento spôsob vo svete rozšírenejší, je čoraz viac viditeľný obrovský potenciál v oblasti výroby pomocou aditívneho spôsobu, ktorý je typický práve pre technológiu 3D tlače. V ňom je finálny objekt vytváraný napríklad sériou na seba skladajúcich sa vrstiev materiálu.

Aditívny spôsob výroby má svoje výhody a nevýhody. Okrem toho, že dokáže vyrobiť tvarovo ťažko realizovateľné produkty pre substraktívny spôsob výroby, jeho veľká prednosť spočíva v málo preskúmaných možnostiach tejto novej technológie. Tento prostý fakt zvyšuje popularitu 3D tlače, pretože mnohým výskumným tímom prináša motiváciu vo forme nových výziev.

3.1.1 Vývoj v oblasti 3D tlače

História 3D tlače sa začína písať v roku 1984, kedy Charles Hull položil základný kameň výrobného procesu nazývaného stereolitografia (SLA). Jednalo sa vtedy o prvý z troch budúcich výrobných procesov, pomocou ktorých môžeme rozdeliť technológiu 3D tlače. Ešte do konca desaťročia sa k stereolitografii pripojili procesy SLS a FDM, ktoré budú spolu s SLA podrobnejšie vysvetlené v kapitole 3.2.[6], [7]

K ďalšiemu dôležitému medzníku prišlo v roku 1992, kedy Charles Hull so svojou vývojárskou spoločnosťou zostavili prvý stereolitografický aparát, ktorý už bol schopný vytlačiť jednoduché predmety. Pokrok výpočtovej techniky v nasledujúcich rokoch vytvoril ideálne podmienky pre ďalší rozvoj 3D tlače. Softwary typu CAD sa neustále zdokonaľovali a okrem toho začali byť dostupnejšie pre širšiu skupinu vývojárov a výrobcov. Tí sa ako prví začali venovať praktickému využitiu 3D vytlačených predmetov. [6], [7]

Nové tisícročie už vníma technológiu 3D tlačenia ako viacstranný nástroj aplikovateľný v rôznych odvetviach. Po celom svete vznikajú ambiciózne výskumy, ktorých výsledky sú vo veľa prípadoch prevratné. Stručný prehľad zaujímavých míľnikov ponúka zdroj [7] a [9]:

| | |
|------|---|
| 2002 | Prvý vytlačený funkčný orgán – 3D oblička. Vedcom sa podarilo vytvoriť zmenšeninu obličky schopnú filtrovať krv a odvádzať nečistoty. |
| 2008 | Prvá 3D tlačiareň schopná vytlačiť svoju presnú kópiu. RepRap projekt bol zameraný na vytvorenie takej 3D tlačiarne, ktorá by umožňovala produkciu väčšiny svojich komponentov potrebných pre konštrukciu nového zariadenia. Cieľom bolo zníženie nákladov pre zaobstaranie 3D tlačiarne, čo malo aj prispieť k väčšiemu záujmu verejnosti. |
| 2008 | Prvý človek chodiaci pomocou 3D vytlačenej protézy. Vývoj medicíny urobil doslova ďalší „krok dopredu“, keď sa podarilo vytvoriť pre pacienta komplexnú a funkčnú repliku končatiny. |
| 2011 | Prvé 3D vytlačené robotické lietadlo (Obr. 1a). Zaujímavým prvkom lietadla sú eliptické krídla zvyšujúce aerodynamickú efektívnosť letu, ktoré by bez použitia 3D tlače boli náročné na výrobu. |
| 2011 | Prvé auto vyrobené na 3D tlačiarňach (Obr. 1b). Auto Urbee je vyváženým riešením ekologickej a ekonomickej otázky transportu osôb. Jeho posledná verzia z roku 2015 drží svetový rekord za prepravu dvoch ľudí z New Yorku do San Francisca (cca 4700 km) za 2 dni s použitím necelých 40 litrov bio-paliva. [10] |
| 2012 | Prvé 3D vytlačené implantáty (Obr. 1c). Špecialistom sa podarilo nahradiť spodnú čeľusť pacientke trpiacej chronickou infekciou kostí. Model sánky je vyrobený z titánového prášku. [15] |



Obr. 1) Na obrázkoch sú znázornené a) ovládacie lietadlo [9]; b) auto Urbee [10] a c) model sánky [15]. Všetky tieto predmety boli vytvorené pomocou 3D tlačiarňí.

3.1.2 Súčasné aplikácie 3D tlače

Za 30 rokov existencie si 3D tlačiarne našli svoje uplatnenie v rôznych výrobných sektoroch. Napríklad pre automobilový priemysel má táto technológia veľký význam. Automobiloví dizajnéri využívajú 3D tlačiarne na tzv. rapid prototyping¹. Tento nenákladný pracovný postup im umožňuje získať o svojom navrhnutom koncepte lepšiu praktickú prehľad (funkčnosť modelu, vhodný tvar a dizajn). Výhodou nepredstavuje len možnosť verifikácie modelu ale aj jednoduchá úprava chýb v príslušnom softvare. [3]

Technológia 3D tlače môže slúžiť aj ako nástroj pomáhajúci rozvíjať nejaký iný vedný odbor. Typickým príkladom je medicína, ktorá kombinuje poznatky technického charakteru

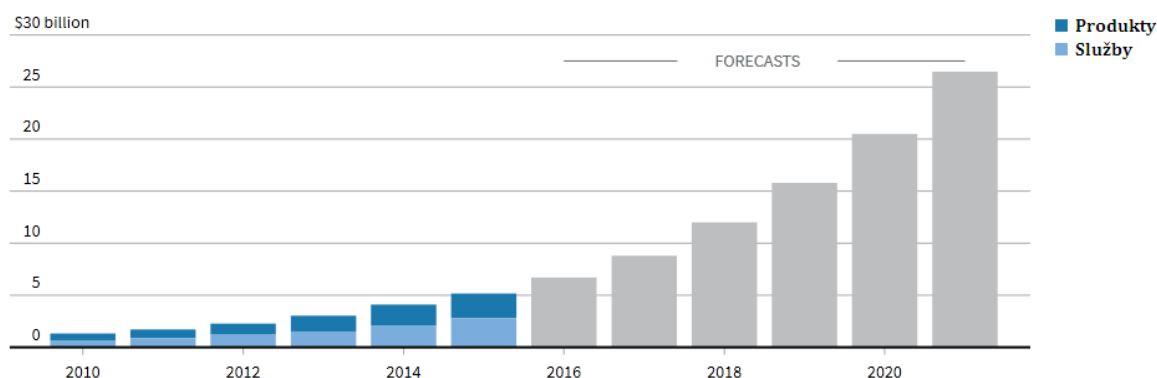
¹Označuje sériu procesov (od modelovania cez pevnostné výpočty až po 3D tlač) nutných k vytvoreniu testovacieho prototypu. Tento pracovný prístup je využívaný najmä dizajnérmí a hlavnou výhodou je nízka časová náročnosť a nízke náklady pri výrobe modelu. [14]

s biologickými. Výsledkom snaženia rôznych vedeckých skupín vzniklo už mnoho produktov pre pacientov, častokrát vytvorených na mieru pre konkrétny typ postihnutia. Medzi produkty vyvinuté špecialistami patria napríklad 3D vytlačené náhradné končatiny alebo 3D implantáty zubov akostí. V súvislosti s medicínou sa kladie dôraz aj na vývoj tzv. bio-tlače. Jej podstatu tvorí výroba 3D náhradných ľudských orgánov s použitím organických materiálov. [3], [16]

S využitím 3D tlačiarň sa čoraz viac stretávame i v súkromnej sfére. Od roku 2011 je zaznamenaný výraznejší rast týchto zariadení zaobstaraných pre osobné účely. K tomu dopomohol aj spomínaný RepRap projekt, s ktorým si užívatelia môžu zhotoviť za rozumné náklady vlastnú 3D tlačiareň. S rastúcim počtom nadšencov vznikli rôzne internetové stránky, ktoré ešte viac dopomáhajú k rozšíreniu znalostí v tejto oblasti. Prostredníctvom týchto stránok si užívatelia z celého sveta vymieňajú skúsenosti alebo zhotovené modely, ktoré poskytujú začiatočníkom inšpiráciu v ďalšej vlastnej tvorbe. [3]

3.1.3 Budúcnosť 3D tlače

Odborníci vo svete očakávajú postupný nárast tržieb týkajúcich sa priemyslu spojeného s 3D tlačiarňami (Obr. 2). Napríklad v roku 2013 mali tržby hodnotu 3 mld. dolárov. Pre rok 2018 je odhadované navýšenie tejto sumy na 12,8 mld. dolárov a prognóza pre rok 2020 ukazuje, že hodnota tržieb by sa mala vyšplhať až na 21 mld. dolárov. [27]



Obr. 2) Grafické znázornenie nárastu tržieb 3D tlače vo svete [17]

Tento údaj dobre znázorňuje skrytý potenciál 3D tlače z ekonomického hľadiska. Pochádza z rozsiahlej analýzy, ktorá obsahuje dáta desiatok spoločností využívajúcich 3D technológiu pre výrobu alebo poskytovanie služieb. Za predpokladu, že sa technológia stále vyvíja smerom k širšej univerzálnosti a dostupnosti zároveň, je možné očakávať postupne vyššie nasadenie 3D tlačiarň v priemyselnej alebo aj v súkromnej výrobe. [27]

Aby mohla 3D tlač vyvolať určitú formu priemyselnej revolúcie, bude musieť prekonať niekoľko technologických prekážok. Z nich sú odvodené nasledujúce nevýhody 3D tlače, ktoré udáva zdroj [18]:

- **Vyššie náklady** súvisiace s kúpou vstupného materiálu, celkovým časom výrobného procesu a zaobstaraním tlačiarne, ktorá nemusí byť univerzálna pre všetky požadované úlohy výrobcu;
- **Nutnosť postprocesingu**; pre vytlačené diely sú typické viditeľné stopy po výrobe – jednotlivé vrstvy na povrchu telesa. Pre menšiu drsnosť povrchu je potrebné finálny výrobok opracovať;
- **Nevýhodné zaradenie do sériovej výroby**; dnešné výrobné linky sú bežne navrhnuté na produkciu veľkého počtu kusov výrobkov za deň. Použitie 3D tlačiarne by samotnú produkciu nielen podstatne znížilo, ale aj by spôsobilo nárast ceny finálneho výrobku;
- **Materiálová obmedzenosť**; tento problém sa vyskytuje najmä pri použití 3D tlačiarne s FDM technológiou, ktorá je najrozšírenejšia a pracuje s princípom, ktorý dovoľuje len použitie plastových materiálov.

Prekonanie týchto hlavných nevýhod 3D tlače môže ovplyvniť každodenný život ľudí rovnako ako príchod počítačov. Už len možnosť použitia rôznych kovových i nekovových materiálov pri 3D tlači bez toho, aby sa akokoľvek negatívne ovplyvnila funkčnosť výrobku, by mohla spôsobiť prevratné zmýšľanie výrobcov pri tvorbe svojho sortimentu. Táto myšlienka tvorí základný pilier pre rapid manufacturing, ktorý na rozdiel od rapid prototypingu je zameraný na koncových užívateľov a nie na test prototypov. Podľa tejto metódy výroby by mal byť zákazník teoreticky schopný rozhodnúť o finálnej podobe svojej objednávky ešte pred tým ako bude zhotovená. Účelom rapid manufacturingu je uspokojenie konkrétnych požiadaviek kupujúceho – iným slovom – personalizácia produktu podľa vlastných potrieb.[3], [6]

Okrem zmien v priemysle by mohla technológia 3D tlače priniesť zmeny aj v iných oblastiach. Asi k najzaujímavejším príkladom patrí už spomínaná medicína, v ktorej pokročilé postupy výroby by ponúkali široký zdroj „náhradných dielov,, pre zdravotné komplikácie bežných ľudí. V najoptimistickejšom prípade má teda technológia 3D tlače schopnosť zdokonaľiť sa do bodu, kedy bude celosvetovo dostupná a vždy pripravená na splnenie akejkolvek požiadavky majiteľa. [3], [6]

3.2 Klasifikácia technológií 3D tlačiarne

Pojem technológia 3D tlače alebo 3D tlač označuje výrobný proces, ktorý aditívnym spôsobom vytvára hmotný 3D objekt na základe digitálnej predlohy. Celý tento proces je možné rozdeliť na 3 fázy.

Prvá fáza je vytvorenie 3D modelu, ktorý bude predstavovať finálny výrobok. Tento 3D model sa bežne navrhuje s použitím rôznych CAD softwarov. Alternatívnou možnosťou, ako získať potrebné údaje k vytvoreniu 3D objektu, je použitie 3D skenera. Zdokonaľovaním tohto zariadenia sa zaoberajú aj spoločnosti ako Microsoft alebo Google, ktoré majú dokonca víziu generovať 3D model s použitím smartfónu. Nevýhodou tvorby modelu pomocou skenovania zostáva ale fakt, že k výrobe kópie je potrebný vzorový predmet. [3]

Po kompletizácii 3D modelu sa prechádza do fázy jeho prípravy pre tlač. To zahŕňa import jeho dát do špeciálneho softwaru pre 3D tlačiarne, ktorý ho rozdelí do niekoľko tenkých na seba nadväzujúcich 2D vrstiev. Jednotlivé 2D vrstvy majú podobu horizontálnych

rezov digitálneho modelu a ich hrúbka závisí od nastavenia užívateľa . Aby sa šetril materiál, býva bežné nahradenie plnej výplne objektu vzorovanou výstužou. [3]

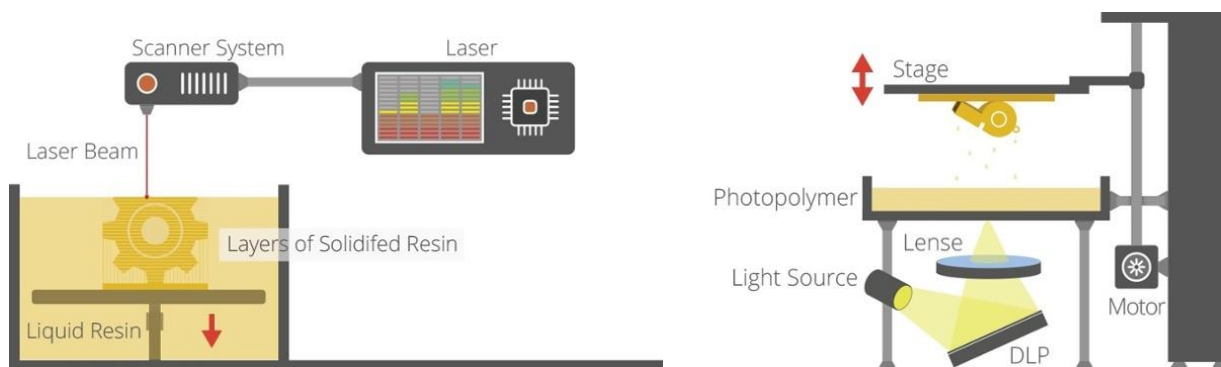
Posledná fáza je samotná tlač objektu, ktorá prebieha po prijatí všetkých potrebných údajov. Vo väčšine prevedení začne tlačiacia hlava ukladať vrstvu po vrstve na vyhrievanú dosku až kým nevznikne konečný výsledok. V niektorých prípadoch je tvar telesa zložitejší a jeho kompletizácia vyžaduje tlačenie materiálu do prázdneho priestoru. Aby sa predišlo chybnému tlačeniu, vytlačia sa navyše k telesu aj oporné časti, ktoré sa po dokončení procesu odstraňujú. [3]

Samotné 3D tlačiarne sa líšia medzi sebou v spôsobe vytvárania tlačených vrstiev. Medzi najrozšírenejšie patria tlačiarne typu FDM, SLS a SLA, ktorých princíp je vysvetlený v nasledujúcich podkapitolách. Vhodnosť ich použitia je rozdielna a závisí od typu použitého materiálu alebo kladených požiadaviek na kvalitu spracovania. Táto diplomová práca sa bude primárne zaoberať typom FDM, pretože technológie SLS a SLA sú príliš nákladné. Z tohto dôvodu bude len typ FDM vysvetlený detailnejšie.

3.2.1 Technológia SLA (Stereolithography Apparatus)

Stereolitografia označuje proces zahrňujúci premenu tekutého fotopolymetrického gélu na pevný objekt. Súčasťou stereolitografického aparátu sú tri komponenty: stavebná podložka, nádrž s fotopolymérom a UV laser, ktorý svojím intenzívnym žiarením reaguje na látku (Obr. 3). Proces stereolitografie začína výstupom stavebnej podložky na úroveň hladiny gélu v nádrži tak, aby ňou zostala stále pokrytá. Následne sa spustí UV laser, ktorý vykreslí všetky detaily, z ktorých je zložená aktuálna 2D vrstva. Fotopolymér citlivý na svetlo po reakcii s paprskami stuhne. Po úplnom vykreslení poklesne stavebná podložka presne o hrúbku jednej vrstvy smerom do nádrže. Tento postup pokračuje až pokiaľ nie je objekt dokončený. [3], [20]

Prednosťou stereolitografie je vysoká presnosť (0,05 mm – 0,15 mm), možná aplikácia rôznych materiálov a nelimitovanosť geometrie produktu. Oproti FDM technológii je ale pomalšia a po finančnej stránke rádovo nákladnejšia. [11], [20]



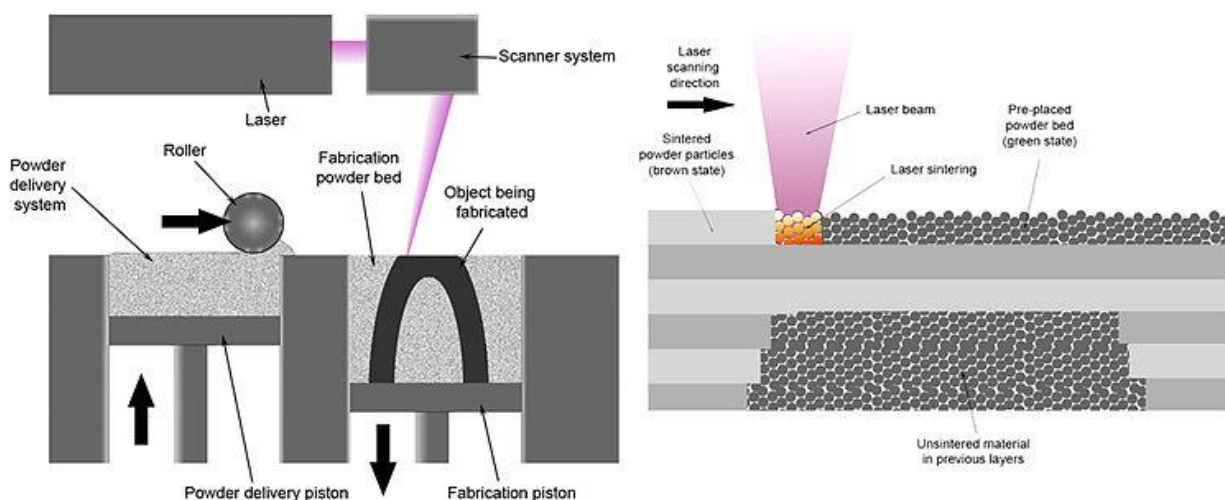
Obr. 3) Porovnanie dvoch konštrukčných variácií SLA technológie. Vľavo je zobrazená bežná varianta a vpravo je varianta s DLP projektorom. [20]

Existuje aj výkonnejší koncept stereolitografického aparátu (Obr. 3), ktorý teoreticky pracuje obráteným smerom (stavebná podložka s tlačným objektom je vyťahovaná z nádrže). Oproti obvyčajnému konceptu je podstate rýchlejšia, pretože dokáže vykresliť všetky detaily jednej vrstvy naraz. Výhodou je aj menšie množstvo odpadového materiálu. Nevýhodou je hlavne vysoká cena. SLA technológia je vhodná napríklad pre tvorbu zubných protéz.[12]

3.2.2 Technológia SLS (Selective Laser Sintering)

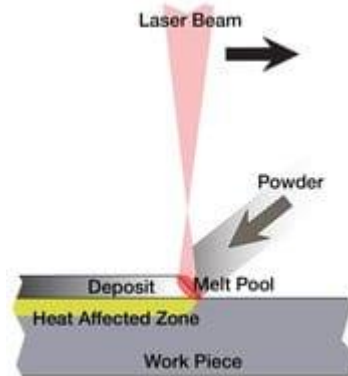
SLS technológia využíva rovnako ako stereolitografia vysoko výkonný laser. Odlišnosť týchto dvoch technológií spočíva v materiáli, ktorý je v tomto prípade práškový. Pôsobením lasera nastáva jeho riadené spekanie za účelom vyformovania konečnej podoby objektu. Ten vzniká opäť po jednotlivých 2D vrstvách na stavebnej podložke, ktorá postupne klesá spolu s nespotrebovaným práškom do voľného priestoru tlačiarne (Obr. 4). [3], [11]

Táto technológia má hneď niekoľko výhod. Nespotrebovaný prášok má funkciu podpor práve formovaného objektu a môže byť znovu použitý. Vďaka vrstvám tenkým od 0,02 mm, zaručuje technológia aj vysokú presnosť. Hlavnou výhodou je ale široká škála použiteľných materiálov. V práškovej forme môže byť použitý na 3D tlač nielen plast, ale aj keramika, sklo, nástrojová a nerezová oceľ, bronz, titánové zliatiny, kobalt-chróm-molybdénové zliatiny alebo špeciálne kompozity. [3], [11]



Obr. 4) Grafické znázornenie výrobného procesu pri technológii SLS. Vľavo je vidieť nanášanie prášku do spekacieho priestoru a vpravo je zobrazený samotný spekací proces. [3]

Počet použiteľných materiálov sa prejavuje aj v počte prevedení 3D tlačiarňí. Priemyselná výroba sa orientuje napríklad na čo najlepšie mechanické vlastnosti vytlačeného objektu. Existujú preto aj také tlačiarne, pri ktorých aplikácia kovového prášku prebieha kontinuálne do miesta dopadu laseru. Táto metóda sa nazýva 3D Laser Cladding (Obr. 5). [21]

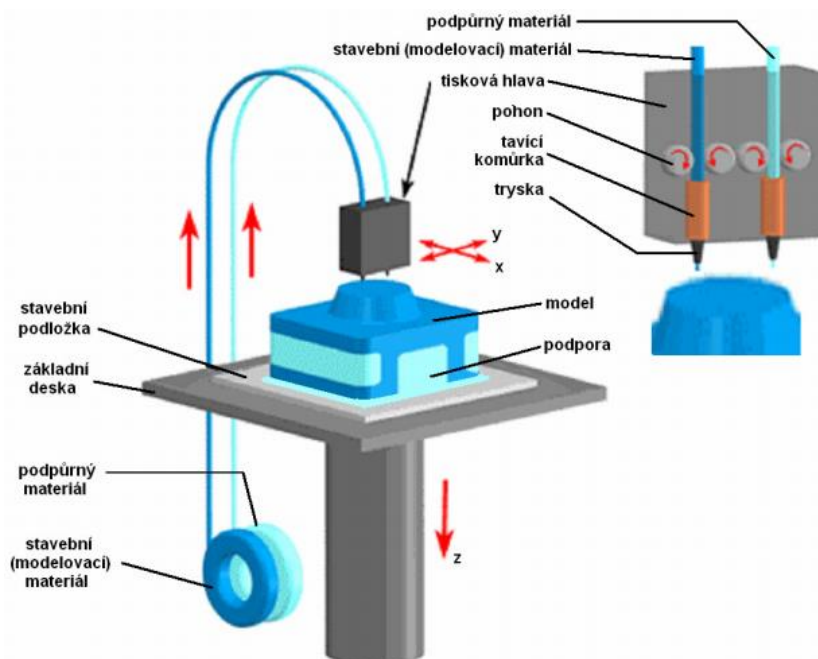


Obr. 5) Metóda 3D Laser Cladding [21]

3.2.3 Technológia FDM (Fused Deposition Modeling)

Najjednoduchšia technológia 3D tlače. Využíva vlákna z termoplastického materiálu (tzv. filamenti), ktoré sú navinuté na kotúčových zásobníkoch. Tie prechádzajú do vyhrievanej tlačiacej hlavy, kde sa natavia (a prípadne zlúčia s iným materiálom alebo farbou) a ďalej v polotekutom stave sú aplikované tryskou hot endu na stavebnú podložku. Na nej po vrstvách vzniká výsledný objekt. Oproti iným technológiám má FDM svoje nedostatky v presnosti a rýchlosti tlače a v zmršťovaní materiálu, ktoré je viditeľné pri väčších rozmeroch produktu. Princíp technológie FDM je vizuálne zobrazený na Obr. 6. [3], [11], [12]

Technológia FDM je vo svete veľmi rozšírená a postupne zväčšuje svoju databázu vhodných materiálov pre tlač. Je to spôsobené tým, že prevedenia tejto technológie sú priebežne zdokonaľované i nekomerčnými užívateľmi. Tí sa snažia zároveň o porovnateľne nižšie náklady pre zaobstaranie 3D tlačiarne. Z dôvodu konštrukcie podobnej gravírovacej frézke je práve FDM technológia vhodná voľba pre splnenie cieľov diplomovej práce. Preto sa bude aj jej obsah ďalej vyvíjať týmto smerom. [3]



Obr. 6) 3D tlačiareň s technológiou FDM. [11]

3.3 Materiály pre 3D tlačiarne typu FDM

Medzi základné materiály, ktoré sa v súčasnosti používajú pre tvorbu objektov FDM technológiou, patrí trojica plastov ABS, PLA a nylon (Obr. 7). Dôkazom ich popularity je aj množstvo variácií, v ktorých sa vyrábajú a to za účelom dosiahnutia špecifických parametrov produktu. Táto podkapitola porovnáva ich vlastnosti, ktoré sú kľúčové k výberu správneho materiálu. Pre komerčnú výrobu je ďalej možné použiť i pokročilejšie materiály, ktorých kvalita je vyššia na úkor ceny. [3]

3.3.1 ABS

ABS je cenovo veľmi dostupný polymér vytvorený na báze petroleja. Vyznačuje sa odolnosťou proti bežným teplotným podmienkam (i proti kyselinám, hydroxidom, olejom a tukom) a spolu s PLA predstavuje efektívne a ekonomické riešenie pri tvorbe testovacích modelov. Vyrába sa v rôznych farebných odtieňoch a jeho kvalitu povrchu je možné chemicky zlepšiť pôsobením výparov acetónu, ktorý rozleptá vrchnú vrstvu objektu, dodá mu lesk a súčasne aj zjednotí jeho drsný povrch. Okrem 3D tlače sa tento materiál uplatňuje pri výrobe Lego stavebníc, airsoftových zbraní, nábytku a fliaš. [3], [24]

Tento materiál má i svoje nevýhody. Musí sa aplikovať na vyhrievanú podložku, aby sa predišlo teplotným deformáciám objektu. K tomu je nerozložiteľný v prírode a s rastúcou teplotou vylučuje toxické výpary, ktoré vznikajú i pri ďalšej manipulácii s materiálom (napr. pri obrábaní). K použitiu vyžaduje teplotu v rozmedzí od 220°C do 250°C. [3]

3.3.2 PLA

Druhý najznámejší materiál súvisiaci s FDM technológiou je PLA. PLA je ekologický, vyrobený z obnoviteľných zdrojov (kukuričný škrob) a so svojimi vlastnosťami predstavuje perfektný materiál pre nekomerčné využitie. Do tohto materiálu sa bežne pridávajú aditíva, v ktorých sa nahradzuje časť kukuričného škrobu drevom, bambusom, medťou alebo fosforom (pre svietiaci efekt). Teplota tlače u PLA sa pohybuje medzi 180°C a 220°C v závislosti na percentuálnom zastúpení prímiesí. Oproti ABS dosahuje PLA konečný povrch vytlačeného objektu síce s lepšou drsnosťou. [3]

Materiály ABS a PLA pomerne ľahko degradujú na vzduchu a preto je doporučené ich skladovať napríklad vo vákuových fóliách, aby sa neznížila kvalita tlače. [3]

3.3.3 Nylon

Ďalším kompatibilným materiálom pre FDM 3D tlačiarne je nylon. Je to pevný a stály syntetický polymér s lepšími mechanickými vlastnosťami ako predchádzajúce materiály, čo sa negatívne prejavuje na jeho mierne vyššej cene. Jeho základná farba je biela a v prípade potreby sa prifarbuje. Kvalita vytlačeného povrchu je porovnateľná s ABS, ale umožňuje

případné zlepšení v podobe obrábania na rozdiel od PLA. Nylon nie je vhodný pre tvorbu malých dielov. Je vhodný naopak pre tlač objektov s pohyblivými časťami. [3]

Pre uschovávanie nylonu je doporučené použitie vzduchotesných nádob, pretože rovnako ako ABS a PLA nepriaznivo reaguje so vzduchom. [3]

Fyzikálne vlastnosti základných typov materiálov sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke podľa zdroja [3]:

Tab 1) Základné vlastnosti materiálov používaných pre 3D tlač

| Materiál | ABS | PLA | Nylon |
|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Tepelná odolnosť výrobkov | 100°C | 50°C | 50°C – 68°C |
| Teplota topenia | 200°C | 155°C | 215°C |
| Teplota samovznietenia | 395°C | - | 343°C |
| Hustota | 1045 kg/m ³ | 1240 kg/m ³ | 1240 kg/m ³ |
| Hrúbka vrstvy | 1 mm – 2,5 mm | 1 mm – 2 mm | 1 mm |



Obr. 7) Vizuálne porovnanie vybraných materiálov na rovnakom objekte. [25]

3.3.4 Iné materiály

K ďalším vhodným materiálom k 3D tlači patrí ASA, PET, PVA, HIPS alebo prírodná živica (Obr. 7). V nasledujúcom odstavci je k týmto materiálom uvedený stručný opis.

PET je označenie polyméru, ktorým sa často nahrádza ABS. Je zdravotne nezávadný, recyklovateľný a v rôznych farbách sa z neho vyrábajú produkty s dlhou životnosťou. PVA a HIPS je dvojica plastov využívaná pri tvorbe podporných častí a to je pre ich výbornú rozpustnosť vo vode (PVA) a limonéne (HIPS). To umožňuje ich jednoduché odstránenie z hotového produktu. Ich nevýhoda je cena spôsobená veľkou spotrebou pre podporné časti. HIPS je recyklovateľný a veľmi dobre spolupracuje s ABS, ktoré má podobné vlastnosti. Prírodná živica dosahuje jeden z najlepších výsledkov pri 3D tlači. Je transparentná, pevná a vhodná na produkty vyžadujúce hladký povrch a množstvo detailov. [3]

3.4 Špeciálne 3D tlačiarne typu FDM

Táto podkapitola poukazuje na dve základné nedostatky, s ktorými sa bežne užívatelia 3D tlačiarň stretávajú – tlač s použitím jedného typu materiálu a zlá kvalita povrchu vytlačeného výrobku. 3D tlačiarne typu FDM sa realizujú v rôznych prevedeniach, väčšinou však ako jednoduché zariadenia, ktoré vzhľadom na svoje nízke náklady nedokážu vyrobiť dokonalú kópiu počítačového modelu výrobku. [3]

Prvé obmedzenie súvisí s typom tlačiarnej hlavy, ktorá je štandardne dimenzovaná na príjem jedného typu materiálu. To znamená, že užívateľ si zo svojich dostupných materiálov môže zvoliť iba jeden typ alebo iba jednu farbu materiálu a počas priebehu tlače nebude môcť vykonať žiadnu zmenu. Tento problém ale nemusí vždy kaziť len vizuálnu stránku výrobku. Na vytvorenie komplikovaných objektov je potrebné použitie minimálne dvoch materiálov, z ktorých jeden sa používa ako podporný a zabezpečuje, aby tlačiarne hlava neaplikovala materiál „do vzduchu“. [3]

Druhé obmedzenie je technologického charakteru a spočíva v hrúbke nanášaných vrstiev. Technológia FDM síce dokáže tlačiť vrstvy s hrúbkou 0,1 mm, ale pri výrobe funkčných dielov sa s danou hodnotou nedá dosiahnuť požadovaný hladký povrch a aj s voľným okom je možné na výrobku pozorovať hrany jednotlivých vrstiev. [3]

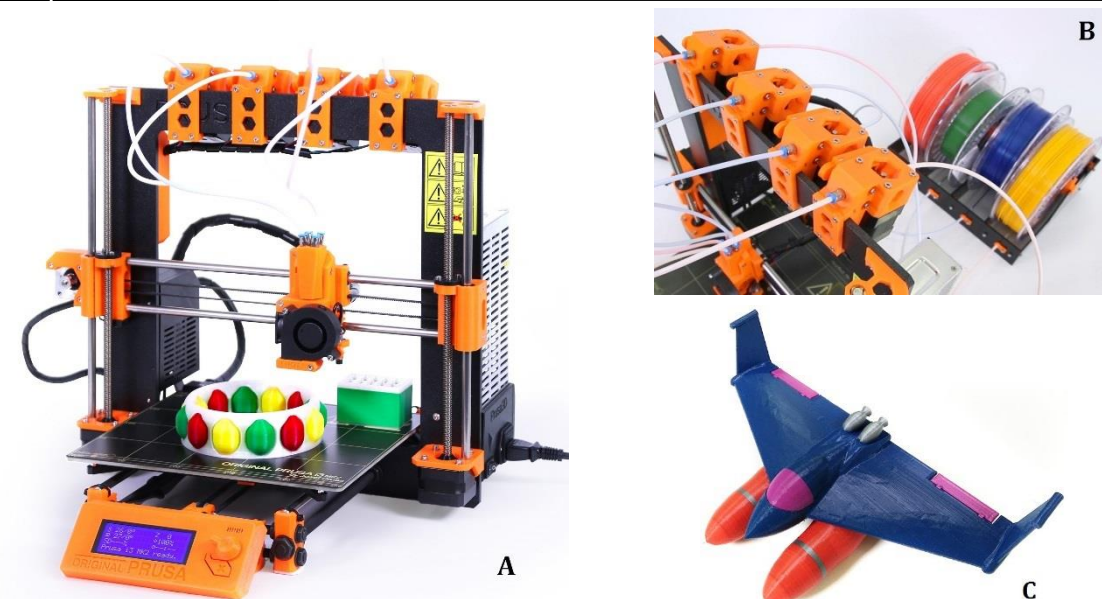
Riešením týchto dvoch situácií sa zaoberajú viacúčelové 3D tlačiarne, ktoré sú bližšie predstavené v nasledujúcich podkapitolách.

3.4.1 Multi materiálové 3D tlačiarne

V súčasnosti sa snaží viacero výrobcov prekonať problém s monochromatickou alebo jedno-materiálovou formou tlače. Táto časť sa zaoberá porovnávaním rôznych konceptov, ktoré tento nedostatok čiastočne alebo úplne riešia.

Prusa i3 MK2 - dual/quad extrusion

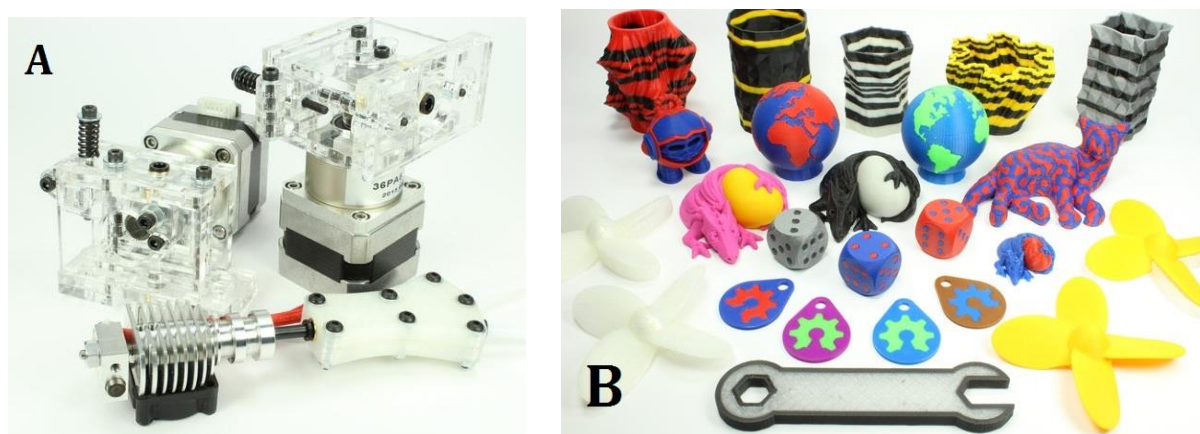
3D tlačiareň Prusa sa ubera pomerne jednoduchou cestou s dobrými výsledkami. Tlač s použitím viacerých materiálov sa dá doceliť v tomto prípade úpravou tlačiarnej hlavy. Krokový motor, ktorý bol súčasťou hlavy a zabezpečoval prísun filamentu (vlákien materiálu) do hot endu, bol odstránený, aby nekomplikoval schopnosť pohybu tlačiarnej hlavy. Spolu s ďalšími tromi novými motormi (každý pre jednu farbu materiálu) bol umiestnený na rám zariadenia, kde nijakým spôsobom neprekáža a odkiaľ spolu s ostatnými podľa potreby privádzajú materiál do tlačiarnej hlavy. Nová tlačiarne hlava ale nie je schopná miešať farby, iba ich meniť počas 3D tlače. Toto elegantné riešenie primárne obchádza mnoho problémov, ktoré by mohli nastať pri koncepte s dvoma tlačiacimi hlavami. Jedinou nevýhodou je plytvanie materiálom, ktoré nastáva pri zmene farby. Počas tejto zmeny sa tlačiarne hlava presunie na okraj stavebnej podložky, kde sa zbaví nepotrebných farby, ktorá zostala v hot ende. Po načítaní novej farby sa presunie späť a pokračuje v tlači. Zariadenie s touto technológiou a ukázkový výrobok sú zobrazené na obrázkoch 8 a) až c). [4]



Obr. 8) Prusa i3 MK2 - dual/quad extrusion vylepšenie; a) celkový pohľad na 3D tlačiareň; b) pohľad na zásobníky materiálu; c) model lietadla vyrobený na tejto 3D tlačiarňi [4]

Prometheus

Podobným príkladom využitia viacerých extruderov a jednej výstupnej trysky sa uberá aj systém Prometheus (Obr. 9). V tomto prípade sa nejedná o celú 3D tlačiareň, ale len o rozširujúce prvky, konkrétne 2 extrudery (každý pre jeden typ materiálu), upravený hot end a tzv. feeder, cez ktorý prechádzajú filameny z extruderov do hot endu. Mixovanie materiálov však nie je umožnené, tlačiareň má možnosť si vybrať len jeden z dvoch dostupných materiálov. Ďalšou nevýhodou je nutnosť kompatibility 3D tlačiarne, ktorá musí spĺňať dve hlavné podmienky: schopnosť pracovať s Cura softwareom a možnosť zapojenia dvoch pohonov do materskej dosky. [26]



Obr. 9) Prometheus systém je zložený zo samostatných dielov: a) 2 extrudery, feeder a hot end; b) výsledné produkty vyrobené pomocou týchto vylepšujúcich dielov. [26]

Diamond Hotend

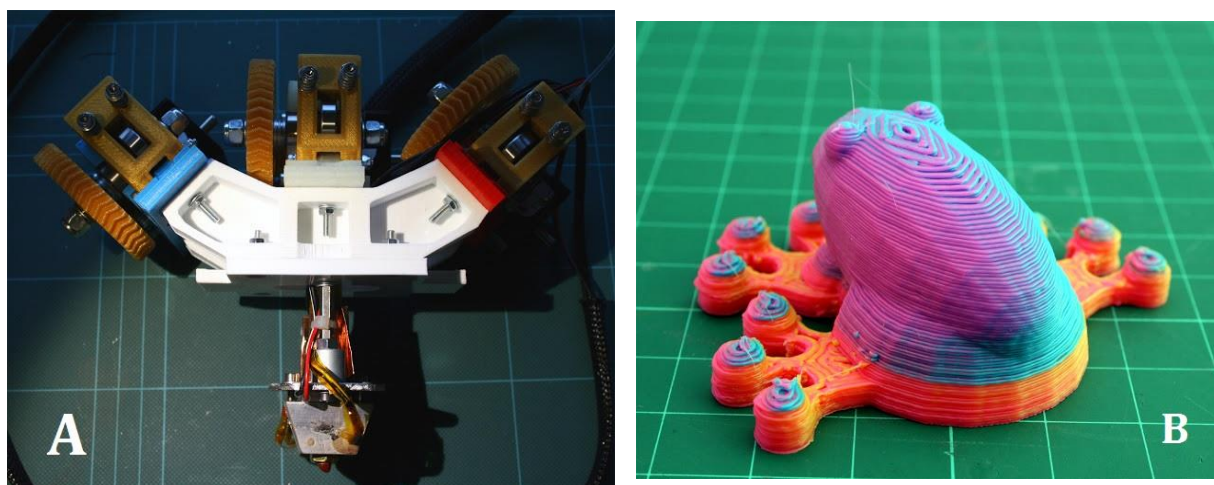
3D tlačiareň typu FDM je možné vylepšiť pomocou Diamond Hotendu (Obr. 10). Tento jednotryskový hotend je navrhnutý na príjem a mixovanie až troch rôznych materiálov alebo farieb. Toto mixovanie prebieha v komôrke, ktorá bola dizajnovaná na čo najmenšie rozmery, aby sa zmena materiálu uskutočnila čo najrýchlejšie a s čo najmenšími stratami. Hrúbka vhodného filamentu pre hot end je 1,75 mm. Pre užívateľov, ktorí už vlastnia 3D tlačiareň typu FDM a chcú ju rozšíriť, predstavuje Diamond Hot end rýchle, presné a jednoduché riešenie a to aj z dôvodu, že sa tryska predáva so všetkými potrebnými časťami. Existuje dokonca i varianta, ktorá dokáže naraz prijímať až 5 materiálov. [23]



Obr. 10) Diamond Hot end tryska s jej produktami [23]

RepRap Projekt

Možnosť farebnej tlače sa objavila i spomínanom RepRap projekte, ktorý je využívaný hlavne v nekomerčnej sfére. Skupina nadšencov si vylepšila svoju 3D tlačiareň pridaním extruderov na tlačiacu hlavu (Obr. 11). Novinkou medzi predchádzajúcimi riešeniami je schopnosť mixovania farieb v hot ende. To umožňuje plynulé prechody farieb, ako je to znázornené na obrázku 14c, na ktorom je objekt vytvorený na tejto tlačiarňi. [13]



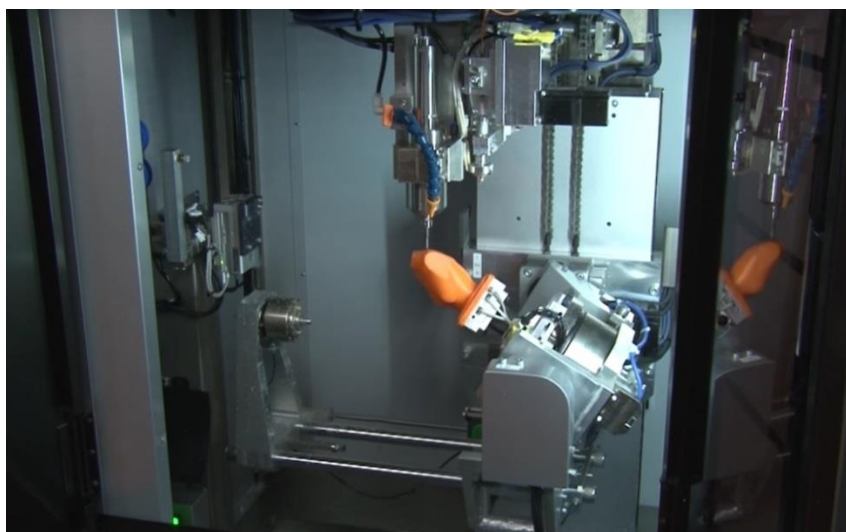
Obr. 11) a) Upravená tlačiacia hlava; b) jej výrobok [13]

3.4.2 Hybridné 3D tlačiarne s obrábacou funkciou

Rovnako ako v predchádzajúcom prípade existuje medzi výrobcami snaha vytvoriť takú 3D tlačiareň, ktorá by bola schopná kombinovať viaceré výrobné úkony. Hlavná myšlienka tejto snahy spočíva v upravovaní konečného tvaru objektu po alebo počas procesu tlačenia. Táto úprava môže byť napríklad vo forme dovŕtania predpripravených dier alebo zlepšenia povrchu objektu odstránením hrán vrstiev vytlačeného telesa.

Enomoto 5-axis 3D printer

V tejto kategórii má svoje postavenie multifunkčné 5-osé výrobné centrum, ktoré spája súčasne aditívny a subtraktívny spôsob výroby (Obr. 12). Vývojári sú presvedčení o tom, že takéto zariadenia predstavujú ďalší dôležitý krok v oblasti priemyselných 3D tlačiarň. Toto výrobné centrum ponúka hneď viacero výhod. Pohybová sústava nie je limitovaná v troch osiach, čo umožňuje plnohodnotné tlačenie a obrábanie všetkých geometrických tvarov výrobku. Zároveň sa pri 3D tlači šetrí materiál, pretože nemusí byť zbytočne aplikovaný ako podpora výrobku. Svojou univerzálnosťou znižuje výrobný čas a malým firmám nezaberá toľko miesta ako dva oddelené stroje. Jeho oblasť použitia je medicína (pri tvorbe implantátov a protéz) a letecký priemysel. [22]



Obr. 12) Enomoto 5-axis 3D printer [22]

ZMorph 2.0 SX

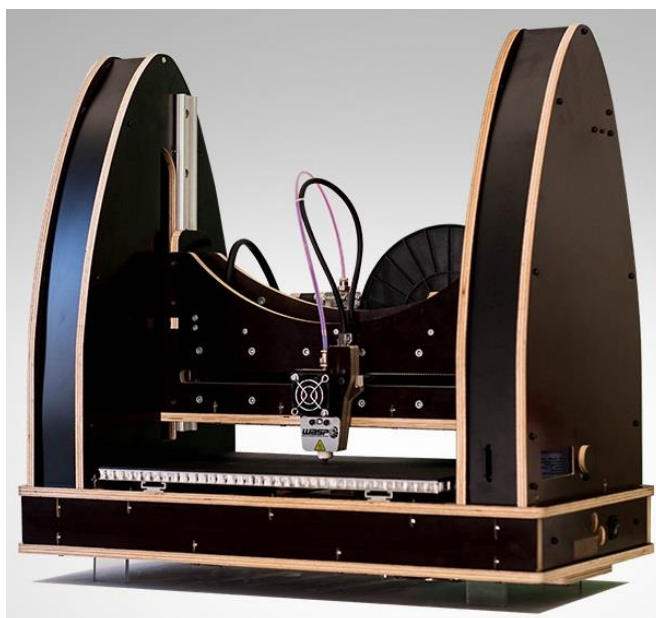
Veľké úspechy má aj 3D tlačiareň ZMorph (Obr. 13), ktorá je vybavená až štyrmi tlačiacimi hlavami špecializovanými na rôzne typy materiálov. Okrem polymérov ako sú ABS, HIPS, PVA, Flex zvládne i sklenené vlákno a materiály vo forme pasty. Ďalšou funkciou, ktorá bola do zariadenia zakomponovaná, je CNC frézovanie s nástrojom, ktorý má priemer 1,75 mm alebo 3 mm. Zvláštnosťou je i možnosť laserového rezania a 3D tlač čokolády. [28]



Obr. 13) ZMorph 2.0 SX [28]

PowerWASP EVO

Posledné univerzálne zariadenie slúži najviac pre domáce použitie. Na druhej strane je veľmi všestranné a okrem 3D tlače si poradí s výrobnými funkciami ako je frézovanie, vŕtanie a gravírovanie. Je konštruované na úpravu dreva, polymérov a hliníku. Jeho nevýhodou je ale pohyb v troch osiach, čo obmedzuje geometriu výrobku a nemožnosť automatickej výmeny tlačiacej hlavy / nástroja. Tento úkon musí byť vykonaný ručne. [29]



Obr. 14) PowerWASP EVO [29]

4 CIELE DIPLOMOVEJ PRÁCE

Diplomová práca sa zaoberá prestavbou troj-osého laboratórneho manipulátora, ktorý už bol v minulosti prerobený na gravírovaciu frézku a 3D tlačiareň. Tentokrát je cieľom navrhnúť zariadenie, ktoré by bolo schopné tieto dva výrobné procesy vykonávať súčasne a to bez zásahu obsluhy pri výmene nástrojov, resp. tlačiacej hlavy. Pri navrhovaní bude mať hlavnú prioritu najlepší pomer ceny a výkonu prestavby.

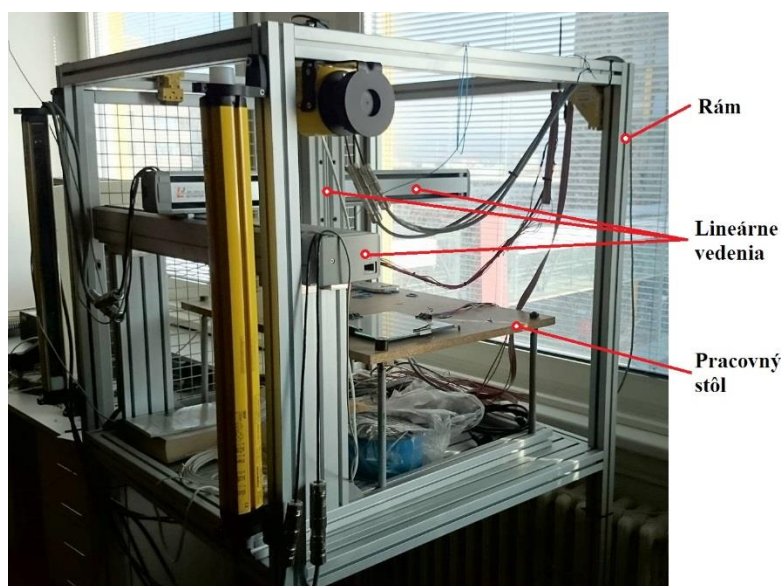
4.1 Definícia požiadaviek na rozšírenie

Aby mal rozširovací projekt jasný cieľ, bude potrebné si definovať niektoré vlastnosti budúceho zariadenia, ktoré sa prestavba bude snažiť naplniť. Vlastnosti budú zostavené podľa zadania diplomovej práce a ich konečné znenie je nasledujúce:

- Zariadenie bude schopné pri tlači naraz používať najmenej 3 rozdielne materiály za účelom ich prípadnej kombinácie na dosiahnutie farebnej rôznorodosti.
- Vybraným obrábacím procesom bude frézovanie, ktoré v rámci možnosti pohybu nástroja v troch osiach bude po dokončení tlače zlepšovať kvalitu povrchu telesa
- Prechod z tlačiacej činnosti na obrábaciu činnosť bude automatizovaný
- Zásobník na filamente bude krytý, aby sa zabránilo degradácii materiálu vplyvom pôsobenia vzduchu

4.2 Rozbor komponentov pôvodného zariadenia

Východzie zariadenie, na ktorom bude prestavba realizovaná, slúžilo ako laboratórny manipulátor na gravírovanie (Obr. 15). Rám zariadenia tvorí klieťka zostavená z hliníkovej zliatiny vo forme štvorcových profilov s rozmermi 45 x 45 mm. Vo vzniknutom priestore je umiestnený pracovný stôl a lineárne vedenia s posunovými šróbmi. Spodná časť vedenia v osi z slúži ako úchyt nástrojov.



Obr. 15) Pohľad na rám, pracovný stôl a lineárne vedenia manipulátora

Pohyb všetkých vedení zabezpečujú servomotory firmy Beckhoff. Ide o trojfázové šesťpólové synchronne servomotory s permanentnými magnetmi. Meranie ich presnej polohy zabezpečujú dvojpolové resolvery. Riadenie servomotorov je riešené pomocou servomeničov Beckhoff rady AX5000, ktoré sú špecializované na riadenie polohy, rýchlosti a momentu synchronných a asynchronných trojfázových motorov. Riadiaca sústava zariadenia je vytvorená priemyslovým počítačom Beckhoff C6925-0000 s operačným systémom Windows XP Embeeded, na ktorom je nainštalovaný program TwinCAT. [1], [2], [5]

V nasledujúcich dvoch tabuľkách sú uvedené základné technické parametre k vedeniam a servopohonom, s ktorými je zariadenie vybavené.

Tab 2) Použité posuvové osi a ich parametry [2], [5]

| Os | X | Y | Z |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| Označenie posuvového vedenia | LJ1H20R20SC-500-FH-X10-Q | LJ1H10R10SC-500-FH-X10-Q | LXPBABC-200S-X18A |
| Typ vedenia | valivé | valivé | valivé |
| Typ šróbu | guličkový | guličkový | guličkový |
| Stúpanie šróbu [mm] | 20 | 12 | 2 |
| Zdvih osi [mm] | 500 | 500 | 200 |
| Opakovateľnosť polohovania [mm] | $\pm 0,05$ | $\pm 0,05$ | $\pm 0,02$ |
| Maximálna posuvová rýchlosť [mm/s] | 500 | 500 | 200 |
| Typ referenčného spínača | magnetický | magnetický | optozávora |

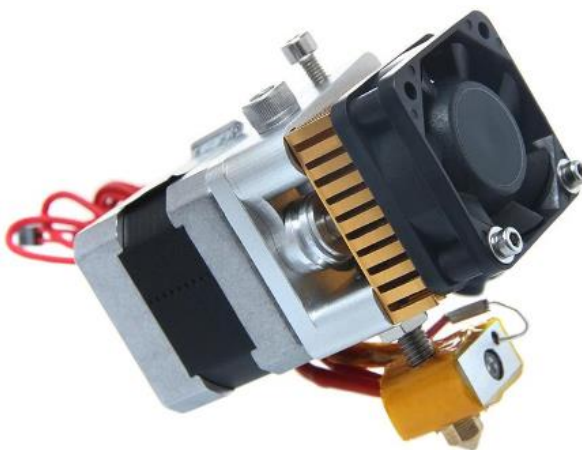
Tab 3) Parametre servomotorov [1], [2]

| Os | X | Y | Z |
|---|-------------------|-------------------|--------|
| Označenie servomotoru | AM 3013-1C00-0000 | AM 3012-1C00-0000 | |
| Menovitý moment [Nm] | 0,36 | 0,28 | |
| Špičkový moment [Nm] | 1,73 | 1,27 | |
| Menovité otáčky [min^{-1}] | 8 000 | 8 000 | |
| Menovitý výkon [W] | 300 | 230 | |
| Špičkový prúd [A] | 7,4 | 7,6 | |
| Konštanta momentu [$\text{Nm} \cdot \text{A}^{-1}$] | 0,28 | 0,21 | |
| Počet pólov | 6 | 6 | |
| Označenie meniča | AX5203 | | AX5103 |
| Počet kanálov | 2 | | 1 |
| Menovitý prúd [A] | 3 | | |
| Špičkový prúd [A] | 7,5 | | |

Po prestavbe troj-osého manipulátora na gravírovaciu frézku bola realizovaná ďalšia prestavba, ktorá tentokrát využila kinematické vlastnosti zariadenia na 3D-tlačiarenské práce. Za týmto účelom bola na pracovný stôl pridaná vyhrievaná stavebná podložka a nástroj určený na frézovanie bol nahradený tlačiacou hlavou (Obr. 17).

Úlohou vyhrievanej podložky je zabezpečenie rovnomernej distribúcie ohrievania na jej povrchu, ktoré je kľúčové k správne mu vytlačeniu modelu. Taktiež slúži na vymedzenie pracovného priestoru, ktorý je použiteľný pre 3D tlač. Podložka zvolená pre prestavbu je typu MK2B a pracuje s napätím v rozmedzí od 12 V do 24 V. To umožňuje reguláciu teploty podložky, čo je výhodou pri tlači. Pre lepšie odoberanie modelov z podložky je na jej povrch ešte pripevnená sklenená doska. [19]

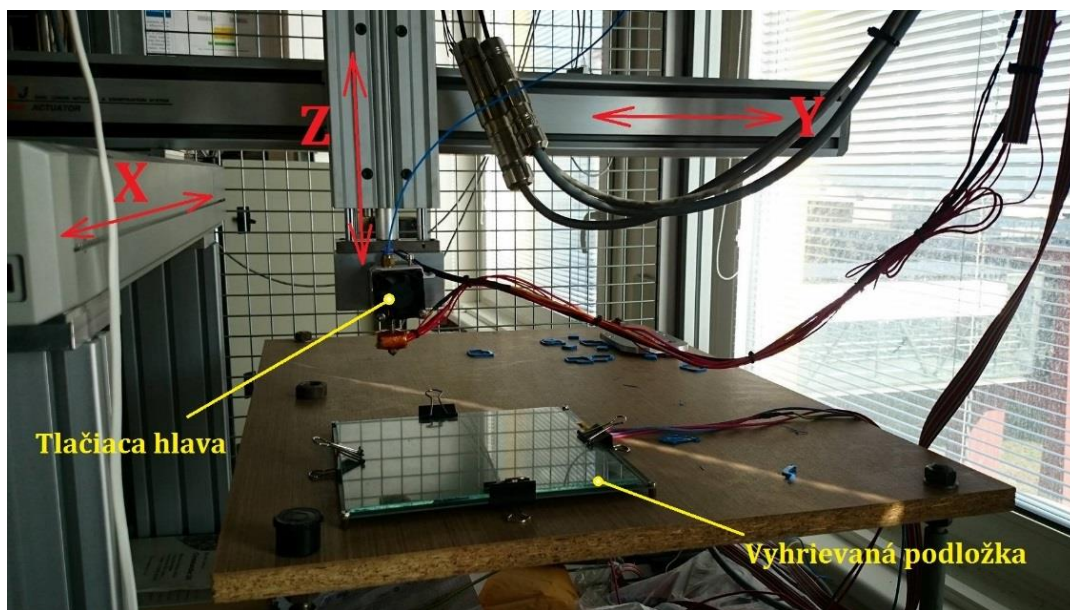
Tlačiacia hlava MK8, ktorá bola pri prestavbe použitá, pochádza od výrobcu Geeetech. Skladá sa z dvoch hlavných zložiek: extrudér a hot end. Funkcia extrudéra je zaistiť posun materiálu (filamentu) do hot endu, čo sa v tomto prípade realizuje pomocou krokového motora a ozubeného kolieska. Priemer filamentu, na ktorý je extrudér dimenzovaný, je 1,75 mm. Hot end je vybavený ohrievacím telieskom, senzorom teploty a tryskou s priemerom 0,4 mm. Tlačiacia hlava je zobrazená na obrázku 16. [19]



Obr. 16) Tlačiacia hlava MK8. [19]

Tab 4) Technické údaje k súčastiam tlačiacej hlavy [19]

| Krokový motor extrudéru | |
|-------------------------|------|
| Počet fáz [-] | 2 |
| Uhol kroku [°] | 1,8 |
| Menovité napätie [V] | 3,75 |
| Menovitý prúd [A] | 1,5 |
| Krútiaci moment [Nm] | 0,5 |
| Ohrievacie teliesko | |
| Výkon [W] | 40 |
| Napätie [V] | 24 |



Obr. 17) Detailný pohľad na druhú prestavbu 3D tlačiarne.

5 KONŠTRUKČNÝ ROZBOR

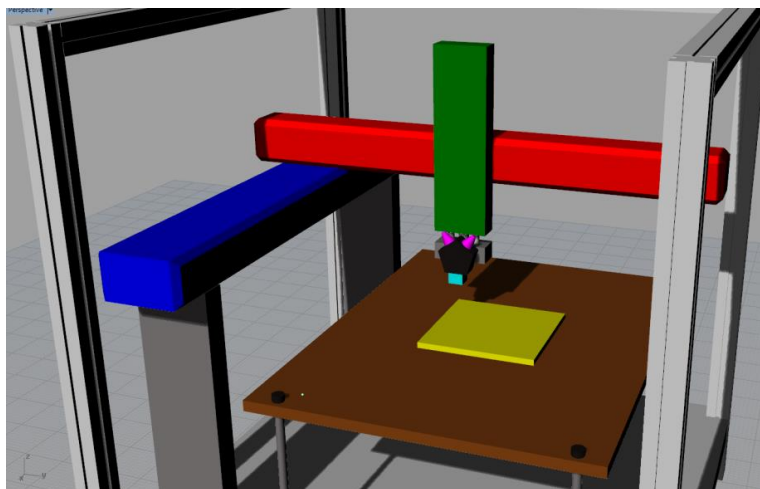
Táto kapitola je zameraná na predstavenie návrhov, ktoré spĺňajú predchádzajúce požiadavky na funkciu zariadenia a zhodnotenie všetkých komponentov, ktoré budú použité pri prestavbe.

5.1 Návrhy prestavby

Na základe rešeršnej časti diplomovej práce a zhodnotenia súčasného konštrukčného prevedenia manipulátora slúžiaceho na 3D tlač boli vypracované štyri koncepty, ktoré spĺňajú uvedené kritériá v predchádzajúcej kapitole. Finálna podoba novej konštrukcie sa následne určí systémovou analýzou. Uvedené modely konceptov sú zjednodušené a slúžia iba pre základnú predstavu myšlienky.

5.1.1 Prevedenie s revolverovou hlavou

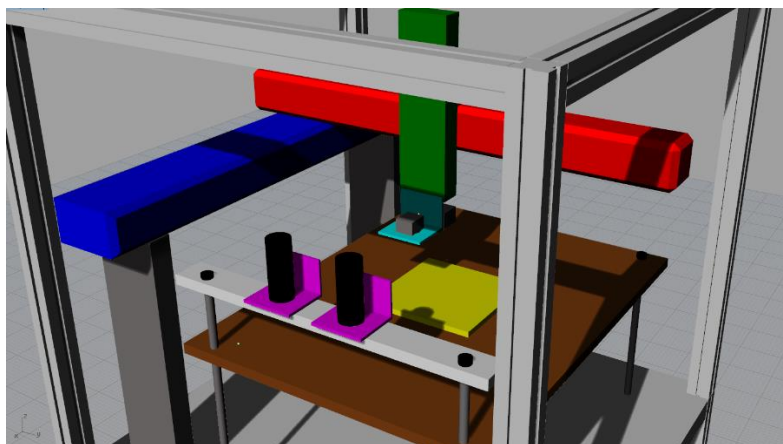
Prvou možnosťou ako doceliť automatický prechod z tlače na obrábanie je použitie revolverovej hlavy (Obr. 18). V závislosti na tvare revolverovej hlavy by teoreticky bolo možné upnutie viacerých frézovacích nástrojov, ktoré by sa menili podľa typu obrábania. Ďalšou výhodou by mohlo byť rozšírenie zariadenia o ďalšiu os a umožniť tým väčšiu voľnosť pri úprave plôch telesa. Nevýhodou je veľký problém pri samotnej realizácii tohto konceptu, kedy by bolo nutné vymyslieť vhodné umiestnenie všetkých potrebných káblov, prípadne prívodov filamentov. Pri kombinácii s frézovacími nástrojmi by musela byť revolverová hlava objemnejšia, čo by sa mohlo prejaviť v strate presnosti polohovania alebo v náraste výrobnéj ceny.



Obr. 18) Varianta A - model 3D tlačiarne s revolverovou hlavou.

5.1.2 Prevedenie s automatickou výmenou nástrojov

Druhý koncept predstavuje možnosť vykonávania automatickej výmeny nástrojov pomocou platformy, na ktorej by boli uložené dostupné nástroje (Obr. 19). Výhodou tohto prevedenia je jednoduchosť a možnosť disponovať v rámci jedného zariadenia širokou škálou nástrojov. Rovnako ako v predchádzajúcom koncepte nastáva ale problém s kabelážou a to najmä pri tlačiackej hlave, ktorá bude konštruovaná na príjem až troch materiálov. V prípade častej výmeny nástrojov by sa výrobný proces mohol mierne spomaliť a pri samotnej zmene si musí zariadenie hľadať nový referenčný bod, z ktorého môže pokračovať v činnosti. Ak by nastalo chybné získanie tohto bodu (napríklad pri zlom uchopení nástroja alebo pri jeho miernom otupení), odrazí sa to v nepresnostiach výroby.

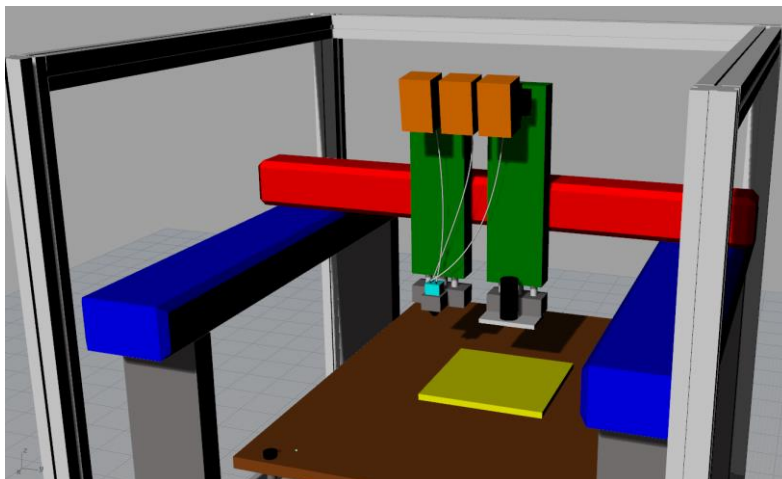


Obr. 19) Varianta B - model 3D tlačiarne s automatickou výmenou nástrojov pomocou zásobníku na nástroje

5.1.3 Prevedenie s dvojitou osou X a Z – spojené osi Z

Tretí a štvrtý koncept, s ktorými je možné vyhovieť požiadavkám v zadaní, sú založené na možnosti plného využitia pracovného priestoru manipulátora. Rozmery pracovného stolu sú v porovnaní s rozmermi vyhrievanej podložky minimálne dvojnásobné a to znamená, že sa dá uvažovať nad pridaním novej osi Z (Obr. 20). Každá os Z bude určená práve na jeden výrobný proces (3D tlač alebo obrábanie) a pri svojej činnosti sa budú striedať. Toto riešenie ponúka odpoveď na nepraktické káblové zapojenie pričom umožňuje rýchlu zmenu výrobných procesov a zároveň ponúka priestor pre uloženie krokových motorov. Nevýhodou sú väčšie nároky na statickú a dynamickú tuhosť vedenia osi Y, ktoré vzniknú pridaním novej osi Z.

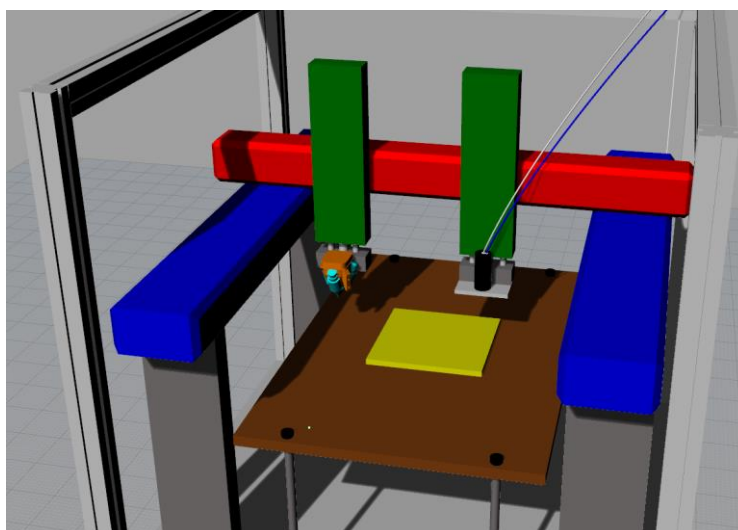
Problém so zvýšením zaťaženia na osi Y má vyriešiť pridanie novej osi X ako podpory, ktorej nasadenie bolo odporúčané z predchádzajúcich pozorovacích skúseností pôvodného zariadenia. Pokles tuhosti zariadenia bol zaznamenaný už pri použití jednej osi Z a to hlavne pri presune osi Z do krajného bodu na vedení osi Y. Z tohto dôvodu je nutné vyvinúť snahu o zlepšenie praktických vlastností manipulátora.



Obr. 20) Varianta C - manipulátor pracuje s dvoma osami Z, ktoré vykonávajú spoločný pohyb po lineárnom vedení. Zároveň umožňujú upnutie krokových motorov.

5.1.4 Prevedenie s dvojitou osou X a Z – samostatné osi Z

Oproti predchádzajúcemu návrhu je na poslednom koncepte vykonaná zmena v rozpojení osí Z. Táto zmena má pomôcť menšiemu dynamickému zaťaženiu osi Y, ktoré narastie pri súčasnom pohybe oboch osí Z. Týmto krokom sa zvýši i presnosť polohovania. Výsledkom tejto varianty budú preto dve osi Z, z ktorých jedna bude nečinne odstavená na kraji vedenia pokiaľ druhá nedokončí svoju úlohu (Obr. 21). Nevýhodou je ale realizácia, pretože pôvodné vedenie osi Y nie je vybavené možnosťou inštalácie dvoch nových vedení. To by sa muselo nahradiť zrejme ozubeným hrebeňom a uložením osí Z na dva pastorky, pretože použitie dvoch matíc na jeden guľčkový šrób predstavuje prekážku. Ďalšou nevýhodou je riadenie systému, ktoré by muselo byť upravené pre tento typ usporiadania.



Obr. 21) Varianta D –dvojité vedenie osi X a Z

5.1.5 Systémová analýza konštrukčného usporiadania

Účelom systémovej analýzy je zvoliť z navrhovaných riešení taký koncept, ktorý bude podľa definovaných kritérií najvhodnejším kandidátom na prestavbu. Kritériá hodnotenia sú zostavené podľa základných výrobných požiadaviek a ku každému z nich je priradená priorita. Vlastnosti návrhov sú ohodnotené na stupnici od 1 do 10 a následne sú vynásobené prioritou. V každom kritériu je najnižším počtom označená varianta, ktorá ho spĺňa najhoršie a najvyšším zase taká, ktorá má v danom kritériu najlepšie vlastnosti. Výstupom systémovej analýzy je bodové ohodnotenie danej varianty, ktoré vznikne sčítaním všetkých členov. Čím viac bodov varianta získa, tým vhodnejšia bude na prestavbu.

- **Kritérium č. 1: Presnosť polohovania**

Priorita: 4

Spolu s tuhosťou zariadenia sa jedná o najdôležitejšie kritérium. Presnosť nástrojov priamo ovplyvňuje kvalitu konečného výrobku a v prípade hybridnej tlačiarne bude dôležité, aby obrábanie povrchu prebiehalo efektívne. Ak by presnosť polohovania nebola dostačujúca, mohlo by obrábanie v skutočnosti zhoršiť mechanické vlastnosti povrchu. Pri variantách, kde sa predpokladá zmena nástroja, bude rovnako dôležité, aby zariadenie našlo správny referenčný bod, z ktorého bude môcť pokračovať vo výrobnom procese.

- **Kritérium č. 2: Tuhosť zariadenia**

Priorita: 4

Tuhosť zariadenia sa rovnako ako presnosť prejavuje vo výslednej kvalite výrobku. Vzhľadom k viac-účelovému zariadeniu sa predpokladá nárast hmotnosti na kritických miestach, s ktorými sa bude musieť systém vysporiadať, aby nedošlo k poškodeniu zariadenia. V tomto prípade bude väčšia tuhosť užitočnejšia pre obrábací proces, pretože pri ňom vznikajú silové účinky, ktoré negatívne ovplyvňujú napríklad akosť povrchu.

- **Kritérium č. 3: Prívod médií**

Priorita: 4

Očakáva sa, že výsledné hybridné zariadenie bude musieť riešiť určité ťažkosti spojené s veľkým množstvom prepojení nástrojov - či už s prívodmi filamentov alebo so sieťou. Z tohto dôvodu je nutné zobrať do úvahy, akým spôsobom bude tento problém riešený. Motiváciou je lepšia manipulácia pri výmene materiálov alebo údržbe a praktickosť.

- **Kritérium č. 4: Riadenie**

Priorita: 3

Kritérium, ktoré sa zaoberá ovládaním pohyblivých a nepohyblivých komponentov. Jednotlivé návrhy sa líšia i počtom elektronických prvkov, ktoré musia byť nejakým spôsobom ovládateľné, aby bola zaručená plná funkčnosť danej varianty. Ďalej pod toto kritérium spadá i celková ovládateľnosť všetkých činností z hľadiska softwaru.

- **Kritérium č. 5: Náklady na prestavbu**

Priorita: 3

Kritérium zohľadňujúce ekonomickú stránku prestavby. Aby rozšírenie univerzitného manipulátora mohlo byť jednoducho zrealizované, je potreba zminimalizovať náklady spojené s jeho prestavbou. To znamená, že na využitie dostupných dielov bude kladený dôraz.

• **Kritérium č. 6: Využitie pracovného stolu**

Priorita: 2

Aj keď má pracovný stôl manipulátora rozmery až 718 x 550 mm, niektoré navrhnuté koncepty sú podľa svojej kinematiky schopné vykonávať plnú svoju funkciu iba v obmedzenom priestore. Kritérium č. 5 preto zohľadňuje možnú celkovú využiteľnosť pracovného priestoru. Použitie veľkoplošných vyhrievaných podložiek býva ale často nepraktické, pretože je ťažšie zabezpečiť rovnomerné ohrievanie celej plochy. Preto sú veľké modely náchylné na teplotnú dilatáciu, ktorá deformuje výsledný model. Tento problém sa rieši kompletným krytovaním zariadenia, čo sa ale negatívne prejavuje na nákladoch a z tohto dôvodu sa na toto kritérium kladie menší dôraz.

• **Kritérium č. 7: Rýchlosť výroby**

Priorita: 2

Keďže výrobky budú produkované na 3D tlačiarňi s technológiou FDM, prejaví sa odlišná rýchlosť iba pri výmene nástrojov (výrobných procesov). S ďalším predpokladom, že výsledné zariadenie nebude využívané pre sériovú výrobu, nie je potrebné na výrobnú rýchlosť kladť veľký dôraz.

• **Kritérium č. 8: Schopnosť zmeny frézovacieho nástroja**

Priorita: 1

Kritérium, ktoré zohľadňuje alternatívne požiadavky na prestavbu. Veľký dôraz by sa oplatilo kladť v prípade, že zariadenie bude využívané pre náročné obrábacie procesy, kde sa uplatní viacero frézovacích nástrojov, prípadne sa k obrábaciemu procesu pripojí i vŕtanie dier.

Tab 5) Systémová analýza pre určenie konštrukčného usporiadania

| Kritérium | Priorita | Varianta | | | |
|---------------------------------------|----------|-----------|-----------|------------|------------|
| | | A | B | C | D |
| Presnosť polohovania | 4 | 5 | 1 | 8 | 10 |
| Tuhosť zariadenia | 4 | 1 | 4 | 8 | 10 |
| Prívod médií | 4 | 1 | 3 | 10 | 9 |
| Riadenie | 3 | 3 | 1 | 10 | 4 |
| Náklady na prestavbu | 3 | 4 | 10 | 1 | 2 |
| Využitie pracovného stolu | 2 | 10 | 9 | 1 | 1 |
| Rýchlosť výroby | 2 | 8 | 1 | 10 | 9 |
| Schopnosť zmeny frézovacieho nástroja | 1 | 5 | 10 | 1 | 1 |
| Výsledný počet bodov | | 89 | 92 | 153 | 143 |

Z výsledkov systémovej analýzy vyplýva, že najlepšou voľbou na prestavbu je varianta C, ktorá uvažuje použitie dvoch osí X a Z, pričom osi Z sú spojené a budú sa pohybovať po saniach. Napriek najvyšším nákladom možno tvrdiť, že sa jedná o výber najlepšieho pomeru ceny a výkonu. Zariadenie bude stabilné a presné, čo je kľúčová vlastnosť pri jeho funkcii, ktorá potrebuje dosiahnuť presnosť až 0,1 mm. Pri zvolení nízko nákladovej alternatívy (napr. varianta B – automatická výmena nástrojov), by sa výrazne prejavovali nedostatky v horšej tuhosti systému, ktorá následne negatívne ovplyvní presnosť a kvalitu 3D tlače / frézovania. Ďalším problémom by bol aj komplikovaný prívod médií.

5.2 Pôvodné diely manipulátora

Aby boli náklady na prestavbu čo najmenšie, je nutné zobrať do úvahy súčasti, ktoré súk dispozícii. V tomto prípade je možné využiť veľkú časť manipulátora – rám, pracovný stôl. Použitelnosť jednotlivých vedení a servopohonov je nutné otestovať výpočtom, ktorý vyhodnotí ich správanie za daných podmienok. Na základe týchto poznatkov sa určí, ktoré komponenty sa budú musieť nahradiť výkonnejšími.

Ďalším dielom, ktorý bude zachovaný je vyhrievaná podložka. Z dôvodu výsledného konštrukčného usporiadania ale bude nutné zmeniť jej polohu na pracovnom stole tak, aby sa na výrobný proces mohla využívať celá jej plocha.

Z hardwarovej časti zariadenia bude zanechaný priemyselný počítač spolu s modulom EtherCAT Bus Coupler a softwareom, ktorý už bol vytvorený k pôvodnému zariadeniu, ale je nutné ho upraviť.

6 VÝPOČTOVÁ DOKUMENTÁCIA

Cieľom výpočtovej dokumentácie je overenie celkovej funkčnosti zariadenia z pohľadu statickej a dynamickej tuhosti a kontrola jednotlivých pohonov osí. Pri zvolenej variante C možno predpokladať zvýšené nároky najmä na os Y, ktorá musí zvládnuť takmer dvojnásobnú záťaž spôsobenú pridaním nových komponentov. Z tohto pohľadu je táto os najkritickejším prvkom zariadenia, ale z dôvodov úplnej bezpečnosti budú overené i ostatné osi.

6.1 Výpočet osi Z – frézovacia činnosť

Rozšírenie zariadenia uvažuje s pridaním novej osi Z, ktorá ale bude rovnakého typu od rovnakého výrobcu. Táto skutočnosť v praxi znamená, že všetky pevnostné a výkonnostné vlastnosti sa budú môcť testovať iba na tom vedení, ktoré z nich bude viac namáhané. V tomto prípade sa zvýšená záťaž týka vedenia, ktoré bude zamerané na frézovaciu činnosť. Dôvodom je pôsobenie kombinácie gravitačných a rezných síl, ktoré pri vznikajú pri kontakte nástroja s obrobkom. Ak bude toto vedenie na základe výsledkov označené za vyhovujúce, je možné vysloviť záver, že vedenie tlačiacej činnosti nebude mať ťažkosti so zvládnutím menších síl.

6.1.1 Rezné sily a parametre frézovania

Frézovacia činnosť stroja je zameraná na obrábanie modelu, ktorý vznikol pri 3D tlači. Zvolený materiál, z ktorého budú všetky modely vyrábané, je plast ABS, ktorý vzhľadom na jeho mechanické vlastnosti nie je náročné obrobiť. Pri zohľadnení hrúbky vrstvy, z ktorých sa vytlačený model skladá, je možné definovať hĺbku rezu s maximálnou hodnotou 1 mm. Aby bolo obrábanie efektívne aj z časového hľadiska, bude zvolená maximálna posunová rýchlosť a vysoké otáčky nástroja, ktoré zaručia dokonalý odber materiálu aj pri malých vzdialenostiach od stredu osi nástroja. Opakovateľnosť polohovania bude 0,1 mm.

Je nutné dodať, že definované obrábacie parametre sú výrazne predimenzované a slúžia iba na určenie krajného zaťaženia, aké by mohlo v teoretickej rovine nastať. Reálne sa bude v rámci dokončovacích prác z obrobkov odoberať oveľa menej materiálu – to znamená, že pre dosiahnutie vyššej kvality povrchu modelu bude stačiť už odobranie 0,1 mm materiálu a skutočná rezná sila nepresiahne ani 10% z reznej sily použitej pre výpočty.

Pri výpočtoch rezných síl bude dôležité aj definovanie frézy. Jej typ je priamo závislý od typu operácie, tzn. od tvaru modelu alebo plochy, ktorá sa bude obrábať. Keďže najväčšie sily budú vznikať pri veľkom odbere materiálu, je zvolená valcová technická fréza s čelným ozubením od firmy ATA. Ak by obrábanie vyžadovalo úpravu povrchov nepravidelného tvaru a zaoblenia, je doporučené použiť frézu guľového typu.



Obr. 22) Valcová technická fréza, ktorá je použitá pre výpočet reznej sily [30]

Tab 6) Zhrnutie zvolených frézovacích parametrov

| Názov | Hodnota |
|---------------------------|--------------------------------|
| Priemer nástroja | $D_n = 6 \text{ mm}$ |
| Počet zubov | $Z_n = 8$ |
| Rýchlosť posuvu | $v_f = 30 \text{ m/min}$ |
| Hĺbka záberu | $a_p = 1 \text{ mm}$ |
| Šírka záberu | $a_e = 6 \text{ mm}$ |
| Otáčky vretena | $n = 15\,000 \text{ min}^{-1}$ |
| Ortogonalný uhol čela | $\gamma_o = 15^\circ$ |
| Uhol nastavenia ostria | $\kappa_n = 90^\circ$ |
| Merná rezná sila | $k_{c1} = 200 \text{ N/mm}^2$ |
| Nárast mernej reznej sily | $m_c = 0,25$ |

Výpočet rezných podmienok je vypracovaný podľa poznatkov v zdrojoch [31] a [32].

Rezná rýchlosť:

$$v_c = \frac{D_n \cdot \pi \cdot n}{1\,000} = 283 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad (1)$$

Posuv na zub:

$$f_z = \frac{v_f}{Z_n \cdot n} = \frac{30\,000}{8 \cdot 15\,000} = 0,25 \text{ mm} \quad (2)$$

Stredná hrúbka triesky pri frézovaní:

$$h_m = \frac{f_z \cdot a_e \cdot 180 \cdot \sin \kappa_n}{\pi \cdot D_n \cdot \arcsin\left(\frac{a_e}{D_n}\right)} = 0,159 \text{ mm} \quad (3)$$

Merná rezná sila pri frézovaní:

$$k_{cf} = k_{c1} \cdot h_m^{-m} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) = 269,14 \text{ MPa} \quad (4)$$

Rezná sila pri frézovaní:

$$F_{cf} = k_{cf} \cdot a_p \cdot f_z = 67,3 \text{ N} \quad (5)$$

Točivý moment na nástroji pri frézovaní:

$$M_{Kf} = F_{cf} \cdot \frac{D_n}{2 \cdot 1000} = 0,202 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6)$$

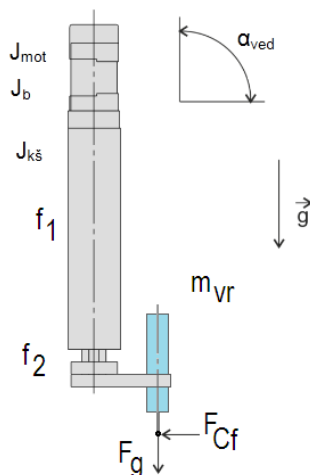
Výkon vretena pri frézovaní:

$$P_f = \frac{a_p \cdot a_e \cdot k_{cf} \cdot v_f}{6 \cdot 10^4} = 0,8 \text{ W} \quad (7)$$

Z uvedených výpočtov vyplýva, že na vedenie osi Z bude pôsobiť rezná sila o veľkosti 67,3 N. Elektrovreteno bude potrebovať ku svojej činnosti výkon o veľkosti 0,8 W.

6.1.2 Kontrola pohonu osi Z

Kontrola pohonu osi Z spočívá vo vyjadrení statických a dynamických účinkov, ktoré vznikajú na vedení vplyvom gravitačných a rezných síl. Tieto sily sú znázornené na schéme posuvového systému (Obr. 23). Rovnako ako v nadväzujúcich prípadoch je cieľom zhodnotiť využiteľnosť pôvodných vedení.



Obr. 23) Schéma posuvového systému v osi Z

Tab 7) Parametry pre kontrolu pohonu posuvovej sústavy osi Z

| Názov | Hodnota |
|---|-------------------------------|
| Hmotnosť elektrovretena s upnutím | $m_{vr} = 1,1 \text{ kg}$ |
| Gravitačné zrýchlenie | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ |
| Menovitý priemer guľčkového šróbu | $d_{0s} = 0,008 \text{ m}$ |
| Malý priemer závit guľčkového šróbu | $d_k = 0,007 \text{ m}$ |
| Stúpanie guľčkového šróbu | $s = 0,002 \text{ m}$ |
| Statická tuhosť guľčkového šróbu | $C_s = 2320 \text{ N}$ |
| Dynamická tuhosť guľčkového šróbu | $C_d = 1510 \text{ N}$ |
| Koeficient v závislosti na uložení pre otáčky | $k_{zo} = 0,42$ |
| Koeficient v závislosti na uložení pre vzper | $k_{zv} = 0,26$ |
| Uhol sklonu vedenia | $\alpha_z = 90^\circ$ |
| Účinnosť valivého vedenia | $\eta_v = 0,98$ |
| Účinnosť KŠM | $\eta_s = 0,92$ |
| Účinnosť ložísk KŠM | $\eta_{Lz} = 0,92$ |
| Súčiniteľ trenia vo vodiacích plochách valivého vedenia | $f_1 = 0,005$ |
| Ekvivalentný súčiniteľ trenia v KŠM redukovaný na polomer šróbu | $f_2 = 0,003$ |
| Prevodový pomer | $i = 1$ |
| Maximálna rýchlosť posuvu | $v_{maxz} = 0,05 \text{ m/s}$ |
| Rezná sila pri frézovaní | $F_{Cf} = 67,3 \text{ N}$ |
| Vzdialenosť medzi ložiskami | $l_{dz} = 0,2 \text{ m}$ |
| Čas potrebný na rozbeh na rýchlosť posuvu | $t = 0,5 \text{ s}$ |

Kontrola pohonu vedenia v osi Z vychádza katalógových informácií od jeho výrobcu a je riešená s podporou zdrojov. [5], [32], [33]

Otáčky guľčkového šróbu pri posuve:

$$n_{\xi} = \frac{60 \cdot v_{maxz}}{s} = 1500 \text{ min}^{-1} \quad (8)$$

Kritické otáčky guľčkového šróbu:

$$n_k = k_{zo} \cdot \frac{d_k}{l_{dz}^2} \cdot 10^5 = 7350 \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

Maximálne dovolené prevádzkové otáčky:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 5880 \text{ min}^{-1} \quad (10)$$

Kontrola kritických otáčok šróbu:

$$n_{\xi} < n_{max} \rightarrow 1500 < 5880 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (11)$$

Kontrola DN (otáčkového) faktoru:

$$D_N = d_{0\xi} \cdot n_{\xi} \cdot 1000 = 12000 \quad (12)$$

Hodnota maximálneho dovoleného otáčkového faktoru pre okružovaný šrób s vymedzenou vôľou je: $D_{Nmax} = 90\,000$ [zdroj]

$$D_N < D_{Nmax} \rightarrow 12000 < 90000 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (13)$$

Prípustné axiálne zaťaženie guľčkového šróbu:

$$F_k = k_{zv} \cdot \frac{d_k^4}{l_{dz}^2} \cdot 10^{11} = 1560,6 \text{ N} \quad (14)$$

Maximálne prípustné zaťaženie šróbu v pracovných podmienkach:

$$F_{kmax} = \frac{F_k}{2} = 780,3 \text{ N} \quad (15)$$

Kontrola vzpernej tuhosti:

$$F_{cf} < F_{kmax} \rightarrow 60,1 < 780,3 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (16)$$

Životnosť guľčkového šróbu v otáčkach:

$$L = \left(\frac{C_d}{F_{cf}} \right)^3 \cdot 10^6 = 1,13 \cdot 10^{10} \text{ min}^{-1} \quad (17)$$

Životnosť guľčkového šróbu v hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C_d}{F_{cf}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_{\xi} \cdot 60} = 125\,500 \text{ h} \quad (18)$$

Celková účinnosť:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz} = 0,829 \quad (19)$$

Minimálny potrebný moment pre pohon osi podľa statického hľadiska:

$$M_{zs} = \frac{F_{cf} \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} \cdot \frac{m_{vr} \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} = 0,029 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (20)$$

Lineárne zrýchlenie osi Z:

$$a_z = \frac{v_{\max z}}{t} = 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (21)$$

Požadované uhlové zrýchlenie guľčkového šróbu a motoru zároveň:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_z}{s} = 314,16 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (22)$$

Tab 8) Veľkosti momentov zotrvačnosti komponentov osi Z

| Názov | Hodnota |
|--------------------------------------|--|
| Moment zotrvačnosti motora | $J_{\text{mot}} = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ |
| Moment zotrvačnosti brzdy motora | $J_b = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ |
| Moment zotrvačnosti guľčkového šróbu | $J_s = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ |

Redukovaný moment zotrvačnosti posuvových hmôt:

$$J_{mz} = m_{vr} \cdot \left(\frac{s}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 1,11 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (23)$$

Celkový moment zotrvačnosti redukovaný na hriadeľ motora:

$$J_{rhm} = J_{\text{mot}} + J_b + J_s + J_{mz} = 7,81 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (24)$$

Predpnutie guľčkového šróbu:

$$F_p = 0,35 \cdot m_{vr} \cdot g = 3,77 \text{ N} \quad (25)$$

Moment zaťaženia spôsobený gravitáciou presúvaných hmôt:

$$M_{Gz} = \frac{m_{vr} \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} = 0,004 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (26)$$

Stratový moment spôsobený odporom vo vedení gravitáciou presúvaných hmôt:

$$M_{GTz} = \frac{m_{vr} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (27)$$

Stratový moment pasívnych odporov spôsobený odporom v guľčkovom šróbe:

$$\begin{aligned} M_{KšMz} &= \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{m_{vr} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{0s} \cdot f_2}{i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} \\ &= 2,18 \cdot 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned} \quad (28)$$

Celkový moment záťaže redukovaný na hriadeľ motora:

$$M_{CRZ} = M_{GZ} + M_{GTZ} + M_{K\dot{S}MZ} = 4,36 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \quad (29)$$

Potrebný minimálny moment motora z dynamického pohľadu:

$$M_{Kdynmin} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{CRZ} = 6,81 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \quad (30)$$

Kontrola kvality dynamických pomerov:

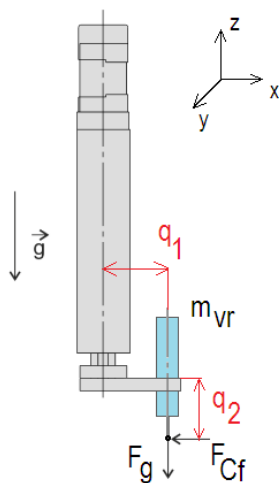
$$\frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{7,86 \cdot 10^{-6}}{3,1 \cdot 10^{-6}} = 2,52 \quad (31)$$

Pomer momentov zotrvačnosti redukovaného na hriadeľ motora a motora je v intervale medzi 1,5 – 3, čo znamená, že sú splnené správne dynamické pomery.

Výpočtami bolo dokázané, že pôvodné vedenie osi Z je vyhovujúce zo statického a aj dynamického hľadiska a môže byť na zariadení zachované. Rovnaký záver možno prehlásiť aj o vedení, ktoré má na starosti tlačiarenskú funkciu.

6.1.3 Pevnostný výpočet osi Z

Pevnostný výpočet kontroluje sily a momenty, ktoré pôsobia na vedenie od vretena a jeho upínania. Výpočet vychádza z obrázku 24.



Obr. 24) Silové pôsobenie na vedenie osi Z

| Názov | Hodnota |
|---|---------------------------|
| Hmotnosť elektrovretena a jeho upnutia | $m_{vr} = 1,1 \text{ kg}$ |
| Gravitačné zrýchlenie [m/s^2] | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ |
| Rezná sila pri frézovaní | $F_{CF} = 67,3 \text{ N}$ |
| Vzdialenosť od stredu elektrovretena k vedeniu | $q_1 = 0,0415 \text{ m}$ |
| Vzdialenosť od pôsobiska reznej sily k úrovni upnutia | $q_2 = 0,07 \text{ m}$ |

Sila spôsobená gravitáciou elektrovretena:

$$F_E = m_{vr} \cdot g = 10,8 \text{ N} \quad (32)$$

Klopňý moment k osi X:

$$M_X = F_{cf} \cdot q_2 = 4,7 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (33)$$

Klopňý moment k osi Y :

$$M_Y = F_E \cdot q_1 = 0,45 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (34)$$

Klopňý moment k osi Z :

$$M_Z = F_{cf} \cdot q_2 = 4,7 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (35)$$

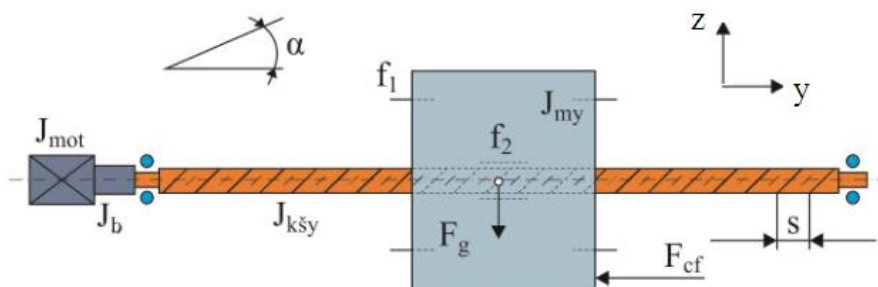
Vzhľadom na veľmi malé pôsobenie síl a momentov je možné považovať vedenie osi Z za dostatočné. Tento záver je možné prehlásiť aj na základe katalógových informácií k vedeniu od výrobcu. Maximálna únosnosť, ktorú deklaruje, má hodnotu 5 kg a jej hraničná hodnota nebola prekonaná.

6.2 Výpočet osi Y

Kontrola vedenia osi Y je považovaná za podstatnú v dôsledku zvýšeného zaťaženia. Úlohou je overenie statického a dynamického správania sa pri pridaní novej osi Z. Pôvodné zariadenie bolo dimenzované iba pre jednu os a v prípade nedostatočných výsledkov bude musieť byť nahradené.

6.2.1 Kontrola pohonu osi Y

Kontrola pohonu osi Y sa ako v predchádzajúcom prípade zaoberá vyjadrením statických a dynamických účinkov, ktoré vznikajú na vedení vplyvom gravitačných a rezných síl. Všetky sily sú zaznačené na schéme posuvového systému (Obr. 25).



Obr. 25) Schéma posuvového systému v osi Y [32]

Tab 9) Parametry pre kontrolu pohonu pôvodnej posuvovej sústavy osi Y

| Názov | Hodnota |
|---|------------------------------|
| Hmotnosť saní s oboma vedeniami Z | $m_{vr} = 15 \text{ kg}$ |
| Gravitačné zrýchlenie | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ |
| Menovitý priemer guľčkového šróbu | $d_{0s} = 0,012 \text{ m}$ |
| Malý priemer závit guľčkového šróbu | $d_k = 0,0105 \text{ m}$ |
| Stúpanie guľčkového šróbu | $s = 0,012 \text{ m}$ |
| Statická tuhosť guľčkového šróbu | $C_s = 11900 \text{ N}$ |
| Dynamická tuhosť guľčkového šróbu | $C_d = 5200 \text{ N}$ |
| Koeficient v závislosti na uložení pre otáčky | $k_{zo} = 1,88$ |
| Koeficient v závislosti na uložení pre vzper | $k_{zv} = 2,05$ |
| Uhol sklonu vedenia | $\alpha_y = 0^\circ$ |
| Účinnosť valivého vedenia | $\eta_v = 0,98$ |
| Účinnosť KŠM | $\eta_s = 0,92$ |
| Účinnosť ložísk KŠM | $\eta_{Lz} = 0,92$ |
| Súčiniteľ trenia vo vodiacích plochách valivého vedenia | $f_1 = 0,005$ |
| Ekvivalentný súčiniteľ trenia v KŠM redukovaný na polomer šróbu | $f_2 = 0,003$ |
| Prevodový pomer | $i = 1$ |
| Maximálna rýchlosť posuvu | $v_{maxy} = 0,5 \text{ m/s}$ |
| Rezná sila pri frézovaní | $F_{Cr} = 67,3 \text{ N}$ |
| Maximálna prípustná hmotnosť nákladu na vedení | $m_{Ymax} = 10 \text{ kg}$ |
| Vzdialenosť medzi ložiskami [m] | $l_{dy} = 0,5$ |
| Čas potrebný na rozbeh na rýchlosť posuvu [s] | $t = 0,5$ |

Kontrola pohonu vedenia v osi Z vychádza z katalógových informácií od jeho výrobcu a je riešená s podporou zdrojov. [5], [32], [33]

Otáčky guľčkového šróbu pri posuve:

$$n_s = \frac{60 \cdot v_{maxy}}{s} = 2500 \text{ min}^{-1} \quad (36)$$

Kritické otáčky guľčkového šróbu:

$$n_k = k_{zo} \cdot \frac{d_k}{l_{dz}^2} \cdot 10^5 = 7896 \text{ min}^{-1} \quad (37)$$

Maximálne dovolené prevádzkové otáčky:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 6317 \text{ min}^{-1} \quad (38)$$

Kontrola kritických otáčok šróbu:

$$n_s < n_{max} \rightarrow 2500 < 6317 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (39)$$

Kontrola DN (otáčkového) faktoru:

$$D_N = d_{0\dot{s}} \cdot n_{\dot{s}} \cdot 1000 = 30000 \quad (40)$$

Hodnota maximálneho dovoleného otáčkového faktoru pre okružovaný šrób s vymedzenou vôľou je: $D_{Nmax} = 90\,000$ [zdroj]

$$D_N < D_{Nmax} \rightarrow 30000 < 90000 \rightarrow VYHOVUJE \quad (41)$$

Prípustné axiálne zaťaženie guľčkového šróbu:

$$F_k = k_{zv} \cdot \frac{d_k^4}{l_{dz}^2} \cdot 10^{11} = 9967 \, N \quad (42)$$

Maximálne prípustné zaťaženie šróbu v pracovných podmienkach:

$$F_{kmax} = \frac{F_k}{2} = 4983,6 \, N \quad (43)$$

Kontrola vzpernej tuhosti:

$$F_{cf} < F_{kmax} \rightarrow 60,1 < 4983,6 \rightarrow VYHOVUJE \quad (44)$$

Životnosť guľčkového šróbu v otáčkach:

$$L = \left(\frac{C_d}{F_{cf}} \right)^3 \cdot 10^6 = 4,61 \cdot 10^{11} \, \text{min}^{-1} \quad (45)$$

Životnosť guľčkového šróbu v hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C_d}{F_{cf}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_{\dot{s}} \cdot 60} = 3\,075\,201 \, h \quad (46)$$

Celková účinnosť:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_{\dot{s}} \cdot \eta_{Lz} = 0,829 \quad (47)$$

Minimálny potrebný moment pre pohon osi podľa statického hľadiska:

$$M_{ys} = \frac{F_{cf} \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} \cdot \frac{m_{vr} \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} = 0,155 \, N \cdot m \quad (48)$$

Lineárne zrýchlenie osi Y:

$$a_y = \frac{v_{maxy}}{t} = 1 \, \frac{m}{s^2} \quad (49)$$

Požadované uhlové zrýchlenie guľčkového šróbu a motoru zároveň:

$$\varepsilon_{\dot{s}} = \varepsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_y}{s} = 524 \, \frac{rad}{s^2} \quad (50)$$

Tab 10) Veľkosti momentov zotrvačnosti komponentov osi Y

| Názov | Hodnota |
|--------------------------------------|--|
| Moment zotrvačnosti motora | $J_{mot} = 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$ |
| Moment zotrvačnosti brzdy motora | $J_b = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ kg.m}^2$ |
| Moment zotrvačnosti guľikového šróbu | $J_s = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$ |

Redukovaný moment zotrvačnosti posuvových hmôt:

$$J_{my} = m_{vr} \cdot \left(\frac{s}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 5,47 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2 \quad (51)$$

Celkový moment zotrvačnosti redukovaný na hriadeľ motora:

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_b + J_s + J_{my} = 6,40 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2 \quad (52)$$

Predpnutie guľikového šróbu:

$$F_p = 0,35 \cdot m_{vr} \cdot g = 51,5 \text{ N} \quad (53)$$

Moment zaťaženia spôsobený gravitáciou presúvaných hmôt:

$$M_{Gy} = \frac{m_{vr} \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} = 0 \text{ N.m} \quad (54)$$

Stratový moment spôsobený odporom vo vedení gravitáciou presúvaných hmôt:

$$M_{GTy} = \frac{m_{vr} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} = 0,0016 \text{ N.m} \quad (55)$$

Stratový moment pasívnych odporov spôsobený odporom v guľikovom šróbe:

$$M_{KšMy} = \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{m_{vr} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{0š} \cdot f_2}{i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} = 0,018 \text{ N.m} \quad (56)$$

Celkový moment záťaže redukovaný na hriadeľ motora:

$$M_{CRy} = M_{Gy} + M_{GTy} + M_{KšMy} = 0,019 \text{ N.m} \quad (57)$$

Potrebný minimálny moment motora z dynamického pohľadu:

$$M_{Kdynmin} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{CRy} = 0,053 \text{ N.m} \quad (58)$$

Kontrola kvality dynamických pomerov:

$$\frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{6,40 \cdot 10^{-5}}{3,1 \cdot 10^{-6}} = 20,65 \quad (59)$$

Pomer momentov zotrvačnosti redukovaného na hriadeľ motora a motora sa nenachádza v intervale medzi 1,5 – 3, čo znamená, že pôvodné vedenie zariadenia nie je schopné pracovať z dynamického hľadiska s dvoma vedeniami Z, o ktoré sa plánuje ho

rozšířit. Z tejto informácie vyplýva, že toto vedenie bude musieť byť nahradené. Pri bližšom skúmaní vlastností vedenia, ktoré sú deklarované výrobcou v online katalógu, sa ďalej zistilo, že maximálna únosnosť, pri ktorej bude vedenie pracovať, je 10 kg. Táto hodnota je uvedená ako maximálna prípustná hmotnosť nákladu na vedení. Rozšírením sa ale dostala hmotnosť všetkých upnutých komponentov na hodnotu 15 kg. Z tohto dôvodu nemôže byť na vedení zrealizovaná iba výmena motoru.

Aby bol riadiaci systém naďalej kompatibilný so všetkými jeho komponentami, volím vedenie od rovnakého výrobcu SMC (Obr. 26). Označenie produktu je LEFS32S7A-500B-S2. Jeho technické parametre sú sčasti zobrazené v tab. 11, ktorá patrí ku kontrolným výpočtom nového vedenia.



Obr. 26) Lineárne vedenie s guľčkovým šróbom od SMC, typ LEFS32S7A-500B-S2 [5]

6.2.2 Kontrola nového pohonu osi Y

Z výpočtov sa zistilo, že pôvodné vedenie osi Y je nedostatočné a muselo byť nahradené novým. Pre úplnosť výpočtovej dokumentácie bude aj toto vedenie kontrolované za pôsobenia rovnakých síl, ktoré boli dosadené do predchádzajúceho výpočtu.

Tab 11) Parametry pre kontrolu pohonu novej posuvovej sústavy osi Y

| Názov | Hodnota |
|---|----------------------------|
| Hmotnosť saní s oboma vedeniami Z | $m_{vr} = 15 \text{ kg}$ |
| Gravitačné zrýchlenie | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ |
| Menovitý priemer guľčkového šróbu | $d_{0s} = 0,016 \text{ m}$ |
| Malý priemer závitú guľčkového šróbu | $d_k = 0,0135 \text{ m}$ |
| Stúpanie guľčkového šróbu | $s = 0,016 \text{ m}$ |
| Statická tuhosť guľčkového šróbu | $C_s = 12050 \text{ N}$ |
| Dynamická tuhosť guľčkového šróbu | $C_d = 6600 \text{ N}$ |
| Koeficient v závislosti na uložení pre otáčky | $k_{zo} = 1,88$ |
| Koeficient v závislosti na uložení pre vzper | $k_{zv} = 2,05$ |
| Uhol sklonu vedenia | $\alpha_y = 0^\circ$ |
| Účinnosť valivého vedenia | $\eta_v = 0,98$ |
| Účinnosť KŠM | $\eta_s = 0,92$ |
| Účinnosť ložísiel KŠM | $\eta_{Lz} = 0,92$ |

| | |
|---|-----------------------------|
| Súčiniteľ trenia vo vodiacích plochách valivého vedenia | $f_1 = 0,005$ |
| Ekvivalentný súčiniteľ trenia v KŠM redukovaný na polomer šróbu | $f_2 = 0,003$ |
| Prevodový pomer | $i = 1$ |
| Maximálna rýchlosť posuvu | $v_{maxy} = 20 \text{ m/s}$ |
| Rezná sila pri frézovaní | $F_{Cr} = 67,3 \text{ N}$ |
| Vzdialenosť medzi ložiskami | $l_{dy} = 0,5 \text{ m}$ |
| Čas potrebný na rozbeh na rýchlosť posuvu | $t = 0,5 \text{ s}$ |

Kontrola pohonu vedenia v osi Z vychádza z katalógových informácií od jeho výrobcu a je riešená s podporou zdrojov. [5], [32], [33]

Otáčky guľčkového šróbu pri posuve:

$$n_{\xi} = \frac{60 \cdot v_{maxy}}{s} = 3000 \text{ min}^{-1} \quad (60)$$

Kritické otáčky guľčkového šróbu:

$$n_k = k_{zo} \cdot \frac{d_k}{l_{dz}^2} \cdot 10^5 = 10152 \text{ min}^{-1} \quad (61)$$

Maximálne dovolené prevádzkové otáčky:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 8122 \text{ min}^{-1} \quad (62)$$

Kontrola kritických otáčok šróbu:

$$n_{\xi} < n_{max} \rightarrow 3000 < 8122 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (63)$$

Kontrola DN (otáčkového) faktoru:

$$D_N = d_{0\text{š}} \cdot n_{\xi} \cdot 1000 = 48000 \quad (64)$$

Hodnota maximálneho dovoleného otáčkového faktoru pre okružovaný šrób s vymedzenou vôľou je: $D_{Nmax} = 90\,000$ [zdroj]

$$D_N < D_{Nmax} \rightarrow 48000 < 90000 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (65)$$

Prípustné axiálne zaťaženie guľčkového šróbu:

$$F_k = k_{zv} \cdot \frac{d_k^4}{l_{dz}^2} \cdot 10^{11} = 27236 \text{ N} \quad (66)$$

Maximálne prípustné zaťaženie šróbu v pracovných podmienkach:

$$F_{kmax} = \frac{F_k}{2} = 13618 \text{ N} \quad (67)$$

Kontrola vzpernej tuhosti:

$$F_{Cf} < F_{kmax} \rightarrow 60,1 < 13618 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (68)$$

Životnosť guľčkového šróbu v otáčkach:

$$L = \left(\frac{C_d}{F_{cf}} \right)^3 \cdot 10^6 = 9,4 \cdot 10^{11} \text{ min}^{-1} \quad (69)$$

Životnosť guľčkového šróbu v hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C_d}{F_{cf}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_s \cdot 60} = 5\,239\,792 \text{ h} \quad (70)$$

Celková účinnosť:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz} = 0,829 \quad (71)$$

Minimálny potrebný moment pre pohon osi podľa statického hľadiska:

$$M_{ys} = \frac{F_{cf} \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} \cdot \frac{m_{vr} \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} = 0,206 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (72)$$

Lineárne zrýchlenie osi Y:

$$a_y = \frac{v_{\max y}}{t} = 1,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (73)$$

Požadované uhlové zrýchlenie guľčkového šróbu a motoru zároveň:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_y}{s} = 628 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (74)$$

Na pohyb nového vedenia osi Y bude potrebný aj nový motor, pretože pôvodný mal nízky moment zotrvačnosti a spôsobil by nevyhovujúce pohybové vlastnosti zariadenia pri presune upnutých hmôt. Z tohoto dôvodu bol vybraný motor od firmy Beckhoff typ AM 3032C. Jeho rozmery sú vhodné pre tento typ vedenia a jeho moment zotrvačnosti dosahuje hodnotu až $6 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Tab 12) Veľkosti momentov zotrvačnosti komponentov osi Y

| Názov | Hodnota |
|--------------------------------------|--|
| Moment zotrvačnosti motora | $J_{\text{mot}} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ |
| Moment zotrvačnosti brzdy motora | $J_b = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ |
| Moment zotrvačnosti guľčkového šróbu | $J_s = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ |

Redukovaný moment zotrvačnosti posuvových hmôt:

$$J_{my} = m_{vr} \cdot \left(\frac{s}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 9,7 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (75)$$

Celkový moment zotrvačnosti redukovaný na hriadeľ motora:

$$J_{rhm} = J_{\text{mot}} + J_b + J_u + J_s + J_{my} = 1,79 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (76)$$

Predpnutie guľičkového šróbu:

$$F_p = 0,35 \cdot m_{vr} \cdot g = 51,5 \text{ N} \quad (77)$$

Moment zaťaženia spôsobený gravitáciou presúvaných hmôt:

$$M_{Gy} = \frac{m_{vr} \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} = 0 \text{ N} \cdot m \quad (78)$$

Stratový moment spôsobený odporom vo vedení gravitáciou presúvaných hmôt:

$$M_{GTy} = \frac{m_{vr} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} = 0,0022 \text{ N} \cdot m \quad (79)$$

Stratový moment pasívnych odporov spôsobený odporom v guľičkovom šróbe:

$$M_{KšMy} = \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{m_{vr} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{0š} \cdot f_2}{i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} \quad (80)$$

$$= 0,024 \text{ N} \cdot m$$

Celkový moment záťaže redukovaný na hriadeľ motora:

$$M_{CRy} = M_{Gy} + M_{GTy} + M_{KšMy} = 0,015 \text{ N} \cdot m \quad (81)$$

Potrebný minimálny moment motora z dynamického pohľadu:

$$M_{Kdynmin} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{CRy} = 0,131 \text{ N} \cdot m \quad (82)$$

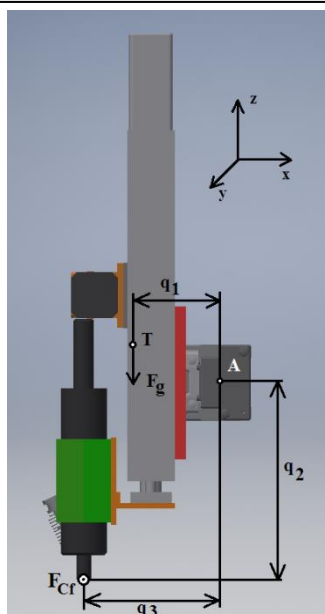
Kontrola kvality dynamických pomerov:

$$\frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{1,79 \cdot 10^{-4}}{6 \cdot 10^{-5}} = 2,9 \quad (83)$$

Pomer momentov zotrvačnosti redukovaného na hriadeľ motora a motora je v intervale medzi 1,5 – 3, čo znamená, že sú splnené správne dynamické pomery pre bezproblémový chod zariadenia. Menovitý točivý moment nového motoru dosahuje hodnotu 2 N.m, čo znamená, že je vhodný aj z hľadiska momentových nárokov, ktoré boli vypočítané z predchádzajúcich vzťahov.

6.2.3 Pevnostný výpočet osi Y

Pevnostný výpočet nového vedenia osi Y porovnáva pôsobiace sily a momenty hodnotami, ktoré sú v technických špecifikáciách uvedené ako maximálne prípustné. Sily sú znázornené na obrázku 27.



Obr. 27) Sily pôsobiace na lineárne vedenie

Tab 13) Veličiny pre výpočet momentov pre vedenie v osi Y

| Názov | Hodnota |
|---|---------------------------|
| Hmotnosť komponentov upnutých navedení | $m_{Gp} = 15 \text{ kg}$ |
| Gravitačné zrýchlenie | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ |
| Rezná sila pri frézovaní | $F_{Cf} = 67,3 \text{ N}$ |
| Súčiniteľ trenia matice a pohybového šróbu | $f_s = 0,003$ |
| Vzdialenosť q_1 (Obr.27) | $q_1 = 0,093 \text{ m}$ |
| Vzdialenosť q_2 pri maximálnom možnom vysunutí (Obr.27) | $q_2 = 0,17 \text{ m}$ |
| Vzdialenosť q_3 (Obr.27) | $q_3 = 0,18 \text{ m}$ |

Celková gravitačná sila:

$$F_{Gp} = m_{Gp} \cdot g = 147,1 \text{ N} \quad (84)$$

Moment okolo osi X vznikajúci reznou silou:

$$M_X = F_{Cf} \cdot q_2 = 11,4 \text{ N.m} \quad (85)$$

Moment okolo osi Y vznikajúci gravitačnou silou:

$$M_Y = F_{Gp} \cdot q_1 = 13,7 \text{ N.m} \quad (86)$$

Moment okolo osi Z vznikajúci reznou silou:

$$M_Z = F_{Cf} \cdot q_3 = 12,1 \text{ N.m} \quad (87)$$

Na základe katalógových informácií od výrobcu sú k dispozícii maximálne prípustné momenty, ktorými môže byť vedenie osi Y zaťažené, rovnako ako aj jeho maximálna prípustná únosnosť. V tabuľke sú s týmito hodnotami porovnávané vypočítané hodnoty.

Tab 14) Porovnávanie vypočítaných a maximálnych hodnôt daných veličín

| Veličina | Porovnávaná hodnota | Maximálna prípustná hodnota |
|----------------------|---------------------|-----------------------------|
| Zaťaženie hmotnosťou | 15 kg | 20 kg |
| Moment okolo osi X | 11,4 N.m | 110,25 N.m |
| Moment okolo osi Y | 13,7 N.m | 25 N.m |
| Moment okolo osi Z | 12,1 N.m | 110,25 N.m |

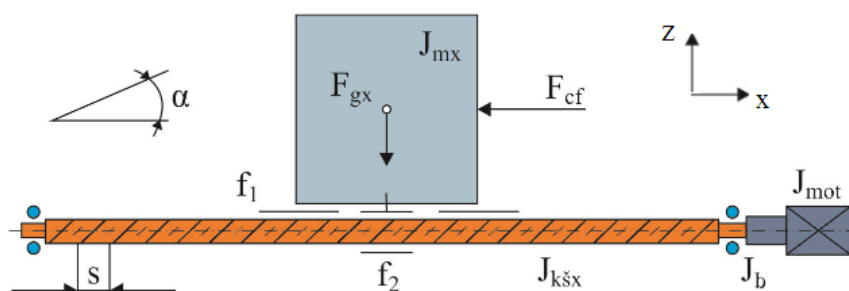
Vo všetkých prípadoch je možné prehlásiť vedenie za vyhovujúce. Navrhnuté nové vedenie obstálo vo všetkých kontrolách (statické, dynamické a pevnostné).

6.3 Výpočet osi X

Kontrola vedenia v osi X bude podobná ako v predchádzajúcich prípadoch. Rozdiel bude ale v pevnostnom výpočte, kde pôsobiaca sila na vedenie X bude polovičná. Nová podpora, ktorá sa plánuje na zariadenie pridať, redukuje zaťažujúce sily na polovicu.

6.3.1 Kontrola pohonu osi X

Posledný pohon, ktorý je nutné ešte skontrolovať, patrí k osi X. Postup kontroly je v princípe zhodný s predchádzajúcimi: vyjadrenie statických a dynamických účinkov a ich porovnanie s prípustnými hodnotami. Sily pôsobiace na vedenie v osi X sú graficky zobrazené na schéme (Obr. 28).



Obr. 28) Schéma posuvového systému v osi X [32]

Tab 15) Parametry pre kontrolu pohonu posuvovej sústavy osi X

| Názov | Hodnota |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Hmotnosť vedení Y, Z1 a Z2 | $m_{vr} = 20,2 \text{ kg}$ |
| Gravitačné zrýchlenie | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ |
| Menovitý priemer guľčkového šróbu | $d_{0s} = 0,015 \text{ m}$ |
| Malý priemer závit guľčkového šróbu | $d_k = 0,013 \text{ m}$ |
| Stúpanie guľčkového šróbu | $s = 0,02 \text{ m}$ |
| Statická tuhosť guľčkového šróbu | $C_s = 11800 \text{ N}$ |

| | |
|---|------------------------------|
| Dynamická tuhosť guľčkového šróbu | $C_d = 6050 \text{ N}$ |
| Koeficient v závislosti na uložení pre otáčky | $k_{zo} = 0,42$ |
| Koeficient v závislosti na uložení pre vzper | $k_{zv} = 0,26$ |
| Uhol sklonu vedenia | $\alpha_x = 0^\circ$ |
| Účinnosť valivého vedenia | $\eta_v = 0,98$ |
| Účinnosť KŠM | $\eta_s = 0,92$ |
| Účinnosť ložísk KŠM | $\eta_{Lz} = 0,92$ |
| Súčiniteľ trenia vo vodiacích plochách valivého vedenia | $f_1 = 0,005$ |
| Ekvivalentný súčiniteľ trenia v KŠM redukovaný na polomer šróbu | $f_2 = 0,003$ |
| Prevodový pomer | $i = 1$ |
| Maximálna rýchlosť posuvu | $v_{max} = 0,05 \text{ m/s}$ |
| Rezná sila pri frézovaní | $F_{Cf} = 67,3 \text{ N}$ |
| Vzdialenosť medzi ložiskami | $l_{dx} = 0,5 \text{ m}$ |
| Čas potrebný na rozbeh na rýchlosť posuvu | $t = 0,5 \text{ s}$ |

Kontrola pohonu vedenia v osi Z vychádza z katalógových informácií od jeho výrobcu a je riešená s podporou zdrojov. [5], [32], [33]

Otáčky guľčkového šróbu pri posuve:

$$n_s = \frac{60 \cdot v_{max}}{s} = 150 \text{ min}^{-1} \quad (88)$$

Kritické otáčky guľčkového šróbu:

$$n_k = k_{zo} \cdot \frac{d_k}{l_{dz}^2} \cdot 10^5 = 13650 \text{ min}^{-1} \quad (89)$$

Maximálne dovolené prevádzkové otáčky:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 10920 \text{ min}^{-1} \quad (90)$$

Kontrola kritických otáčok šróbu:

$$n_s < n_{max} \rightarrow 150 < 10920 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (91)$$

Kontrola DN (otáčkového) faktoru:

$$D_N = d_{0s} \cdot n_s \cdot 1000 = 2250 \quad (92)$$

Hodnota maximálneho dovoleného otáčkového faktoru pre okružovaný šrób s vymedzenou vôľou je: $D_{Nmax} = 90\,000$ [zdroj]

$$D_N < D_{Nmax} \rightarrow 2250 < 90000 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (93)$$

Prípustné axiálne zaťaženie guľčkového šróbu:

$$F_k = k_{zv} \cdot \frac{d_k^4}{l_{dz}^2} \cdot 10^{11} = 18564 \text{ N} \quad (94)$$

Maximálne prípustné zaťaženie šróbu v pracovných podmienkach:

$$F_{k \max} = \frac{F_k}{2} = 9282 \text{ N} \quad (95)$$

Kontrola vzpernej tuhosti:

$$F_{Cf} < F_{k \max} \rightarrow 67,3 < 9282 \rightarrow \text{VYHOVUJE} \quad (96)$$

Životnosť guľčkového šróbu v otáčkach:

$$L = \left(\frac{C_d}{F_{Cf}} \right)^3 \cdot 10^6 = 7,26 \cdot 10^{11} \text{ min}^{-1} \quad (97)$$

Životnosť guľčkového šróbu v hodinách:

$$L_h = \left(\frac{C_d}{F_{Cf}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_s \cdot 60} = 80\,719\,492 \text{ h} \quad (98)$$

Celková účinnosť:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz} = 0,829 \quad (99)$$

Minimálny potrebný moment pre pohon osi podľa statického hľadiska:

$$M_{xs} = \frac{F_{Cf} \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} \cdot \frac{m_{vr} \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} = 0,258 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (100)$$

Lineárne zrýchlenie osi Z:

$$a_x = \frac{v_{\max x}}{t} = 0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (101)$$

Požadované uhlové zrýchlenie guľčkového šróbu a motoru zároveň:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_x}{s} = 31,41 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (102)$$

Pôvodný motor poháňal iba jedno vedenie osi Z a pri bližšom skúmaní jeho technických vlastností sa došlo k záveru, že pri aktuálnom zaťažení je nevyhovujúci z hľadiska nízkeho výkonu a momentu zotrvačnosti. Bol preto nahradený výkonnejším typom od rovnakého výrobcu Beckhoff. Nový typ má označenie AM 3033C. [34]

Tab 16) Veľkosti momentov zotrvačnosti komponentov osi X

| Názov | Hodnota |
|--------------------------------------|--|
| Moment zotrvačnosti motora | $J_{\text{mot}} = 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ |
| Moment zotrvačnosti brzdy motora | $J_b = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ |
| Moment zotrvačnosti guľčkového šróbu | $J_s = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ |

Redukovaný moment zotrvačnosti posuvových hmôt:

$$J_{mx} = m_{vr} \cdot \left(\frac{s}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (103)$$

Celkový moment zotrvačnosti redukovaný na hriadeľ motora:

$$J_{rhm} = J_{mot} + J_b + J_s + J_{mx} = 3,12 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (104)$$

Predpnutie guľčkového šróbu:

$$F_p = 0,35 \cdot m_{vr} \cdot g = 34,7 \text{ N} \quad (105)$$

Moment zaťaženia spôsobený gravitáciou presúvaných hmôt:

$$M_{Gx} = \frac{m_{vr} \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_c} = 0 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (106)$$

Stratový moment spôsobený odporom vo vedení gravitáciou presúvaných hmôt:

$$M_{GTx} = \frac{m_{vr} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} = 0,0018 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (107)$$

Stratový moment pasívnych odporov spôsobený odporom v guľčkovom šróbe:

$$M_{KšMx} = \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} \cdot (1 - \eta_s^2) + \frac{m_{vr} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{0š} \cdot f_2}{i \cdot \eta_s \cdot \eta_{Lz}} = 0,02 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (108)$$

Celkový moment záťaže redukovaný na hriadeľ motora:

$$M_{CRx} = M_{Gx} + M_{GTx} + M_{KšMx} = 0,022 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (109)$$

Potrebný minimálny moment motora z dynamického pohľadu:

$$M_{Kdynmin} = J_{rhm} \cdot \varepsilon_m + M_{CRx} = 0,025 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (110)$$

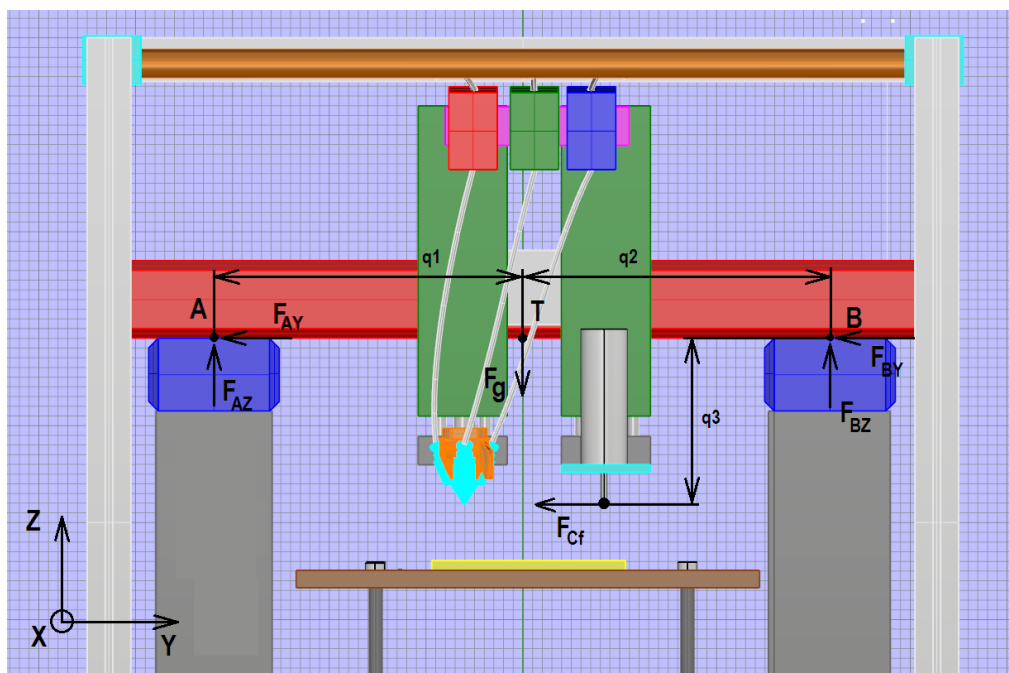
Kontrola kvality dynamických pomerov:

$$\frac{J_{rhm}}{J_{mot}} = \frac{3,12 \cdot 10^{-4}}{8,5 \cdot 10^{-5}} = 3,47 \quad (111)$$

Pomer momentov zotrvačnosti redukovaného na hriadeľ motora a motora je mimo intervalu od 1,5 do 3, čo znamená, že dynamické pomery nie sú úplne splnené. Motor bol ale zvolený pre jeho vysoký točivý moment a za predpokladu, že sa pri výrobe nebude využívať maximálna rýchlosť posuvov, je možné považovať tento motor za vyhovujúci. Toto riešenie za cenu nižších nákladov môže mierne predĺžiť výrobný proces. Alternatívou by mohol byť motor z vyššej rady od rovnakej spoločnosti, typ AM 3042C, ktorý už za daných podmienok bude pracovať bez obmedzenia.

6.3.2 Pevnostný výpočet osi X

Pevnostný výpočet osi X vychádza z predpokladu, že na zariadenie bude pridané nové vedenie ako podpora. Jeho funkcia bude čisto oporná, nebude sa podieľať na spoločnom pohone a z tohto dôvodu bude dimenzované iba na vysokú tuhosť. Pri tejto konfigurácii sa predpokladá, že menšiu pevnosť bude mať pôvodné lineárne vedenie a preto budú do výpočtov priradované jeho parametre.



Obr. 29) Sily pôsobiace na lineárne vedenie

Tab 17) Veličiny pre výpočet momentov pre vedenie v osi Y

| Názov | Hodnota |
|--|----------------------------|
| Hmotnosť celého priečniku | $m_{Gp} = 20,2 \text{ kg}$ |
| Gravitačné zrýchlenie | $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ |
| Rezná sila pri frézovaní | $F_{Cf} = 60,1 \text{ N}$ |
| Súčiniteľ trenia matice a pohybového šróbu | $f_s = 0,003$ |
| Vzdialenosť q_1 (Obr.29) | $q_1 = 0,25 \text{ m}$ |
| Vzdialenosť q_2 (Obr.29) | $q_2 = 0,25 \text{ m}$ |
| Vzdialenosť q_3 (Obr.29) | $q_3 = 0,42 \text{ m}$ |

Statická rovnováha síl v osi Y:

$$F_{AY} + F_{Cf} + F_{BY} = 0 \quad (112)$$

Statická rovnováha síl v osi Z:

$$F_{AZ} + F_{BZ} - F_{Gp} = 0 \quad (113)$$

Gravitačná sila spôsobená hmotnosťou:

$$F_{Gp} = m_{Gp} \cdot g = 198 \text{ N} \quad (114)$$

Moment v bode A okolo osi X:

$$F_{BZ} \cdot (q_1 + q_2) - F_{Gp} \cdot q_1 - F_{Cf} \cdot q_3 = 0 \quad (115)$$

Úpravou vzťahu (88) je vyjadrená radiálna sila pôsobiaca na pravé vedenie:

$$F_{BZ} = \frac{F_{Gp} \cdot q_1 + F_{Cf} \cdot q_3}{q_1 + q_2} = 149,5 \text{ N} \quad (116)$$

Úpravou vzťahu (86) je vyjadrená radiálna sila pôsobiaca na ľavé vedenie:

$$F_{AZ} = F_{Gp} - F_{BZ} = 48,5 \text{ N} \quad (117)$$

Pri sile, ktorá pôsobí na dotyčnici na ľavé vedenie, je prekladaná rovnaká hodnota ako pri dotyčnicovej sile, ktorá pôsobí na pravú stranu. Vzťah pre jej výpočet je získaný z rovnice (85):

$$F_{AY} = F_{BY} \rightarrow F_{AY} = \frac{F_{Cf}}{2} = -30 \text{ N} \quad (118)$$

Katalógové informácie o tomto type lineárneho vedenia udávajú, že prípustná únosnosť pri takomto type pôsobiacich síl na vedenie je až 30 kg. Reakčné sily a momenty sú v porovnaní s tuhosťou vedenia menšie. Lineárne vedenie vyhovuje. [5]

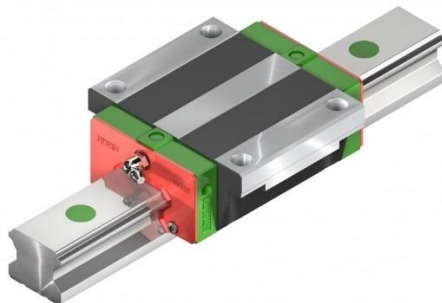
7 ROZŠIRUJÚCE KOMPONENTY

Aby prestavba spĺňala definované vlastnosti, bude nutné zakúpiť k pôvodným dielom niekoľko nových komponentov. Cieľom tejto kapitoly je zhrnutie všetkých rozširujúcich súčiastok, ktoré budú na zariadenie pridané a zobrazenie konečnej podoby novej 3D tlačiarne. Typy vedení a pohonov boli zvolené na základe výsledkov výpočtov, ktoré sú uvedené v predchádzajúcej kapitole.

7.1 Nové vedenie osi X

Prvé rozšírenie má za úlohu zvýšiť celkovú tuhosť systému a to prostredníctvom nového podporného vedenia. Jeho prítomnosť sa ukázala byť kľúčová, pretože pôvodný manipulátor strácal stabilitu pri krajnej polohe osi Z na osi Y. Prispeje to nielen k vyššej bezpečnosti zariadenia v kritických bodoch ale aj k zlepšeniu presnosti pri tlači a obrábaní. Týmto spôsobom získalo zariadenie podobu portálovej frézky, na ktorej bude zaťaženie rovnomerne rozložené na dve vedenia osi X.

Podporné vedenie bolo zvolené od výrobcu Hiwin. Jedná sa o profilové lineárne guľikové vedenie rady HG, ktorá je určená pre aplikácie s vysokým dôrazom na presnosť, tuhosť a únosnosť. Vedenie sa skladá z koľajnice typu HGR25R630H a prírubového vozíku typu HGW 25 HC (Obr. 30). Pri voľbe typu sa kládol dôraz na to, aby vedenie svojou pevnosťou prekonalo pôvodné vedenie.



Obr. 30) Lineárne guľikové vedenie rady HG od Hiwin [35]

Nové vedenie bude uložené na dvoch hliníkových profiloch typu 104513 od firmy Alutec KK (Obr. 31). Rozmery profilov sú 45 x 120 x 515 mm. [36]

7.2 Náhradné vedenie osi Y

Pôvodné vedenie bolo nahradené novým z dôvodu nedostatočného výkonu motora a malej prevádzkovej únosnosti. Nové vedenie je od rovnakého výrobcu SMC, tentokrát to je typ LEFS32S7A-500B-S2, ktorý bude poháňaný servomotorom AM 3032C od Beckhoff. Táto konfigurácia osi Y sa ukázala byť zo všetkých strán ako najlepšia. Vedenie spĺňa i požiadavky na presnosť polohovania. Informácie o týchto dvoch komponentoch sú čerpané zo zdrojov [5] a [34].

7.3 Nová os Z

Pridanie novej osi Z umožnilo dimenzovať každú os práve pre jeden výrobný proces (tlač, obrábanie). Nové vedenie osi Z, ktoré sa podľa navrhnutého konceptu pridáva na zariadenie, bude typovo totožné s pôvodným. Výpočtami bolo overené, že nie je potrebné pridávať na zariadenie výkonnejší typ. To platí aj o jeho servomotore AM 3012-1C, ktorého výkon i moment zotrvačnosti sú pri malých zaťaženiach dostatočné.

7.4 Nový motor vedenia X

Vedenie v osi X potrebuje tak isto ako nové vedenie Y nový a výkonnejší motor. Podľa výpočtov boli vybrané dva najvhodnejšie: AM 3033C a AM 3042C. Použitie prvého typu viedlo zariadenie k mierne zhoršeným dynamickým podmienkam, ktoré sa ale neprejavujú počas 3D tlače alebo frézovania. Alternatíva, ktorá bola vybratá, je podstatne výkonnejšia a jeho kúpa by mala byť zhodnotená na základe budúceho uvažovania o využití zariadenia.

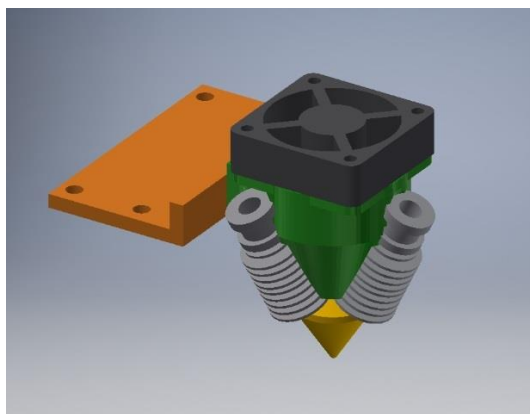
7.5 Tlačiacia sústava

V teoretickej časti diplomovej práce boli uvedené príklady, akým spôsobom je možné docieľiť použitie viacerých materiálov počas 3D tlače. Z nich bol na prestavbu manipulátora vybraný produkt Diamond Hot End a to pre najlepší pomer ceny a výkonu. Okrem vysokej kvality vytlačených výrobkov je jeho veľkou prednosťou možná kúpa celej rozširujúcej sady, ktorá obsahuje nielen tlačiarenskú hlavu, ale aj krokové motory, extrudéry a bowdeny, ktoré budú obzvlášť užitočné kvôli väčším rozmerom manipulátora. Ďalšou prednosťou trysky je malá mixovacia komora, ktorá umožňuje rýchlu zmenu farby aj bez zbytočného plytvania materiálom.

Celá tlačiacia sústava, ktorá bude montovaná na zariadenie, pozostáva zo zásobníku, kde je uschovaný materiál, krokových motorov, ktoré tento materiál odčerpávajú a tlačiacej hlavy, ktorá bude aplikovať materiál na vyhrievanú dosku.

7.5.1 Tlačiacia hlava

Diamond tlačiacia hlava sa skladá z piatich častí: tryska, chladič, ventilátor, držiak hlavy a upínač, ktorý je napojený na vedenie (Obr. 31). Ďalej je do hot endu je zabudovaný 12 V a 40 W vyhrievač, ktorého teplotu neustále sníma olovený termistor. Aby nedošlo k roztaveniu materiálu na nesprávnej pozícii, je súčasťou spomínaný ventilátor, ktorý pomáha ochladzovať chladič. Priemer filamentu vystupujúceho z trysky je 0,4 mm. Srdce hlavy tvorí plastový držiak, ktorý spravidla je vytlačený na inej 3D tlačiarňi. Použitý ventilátor je 12 voltový od výrobcu Multicomp, typ MC 35357. Táto zostava sa dá ešte rozšíriť o bočný ventilátor, ktorým rýchlejšie schne objekt. [38], [41]

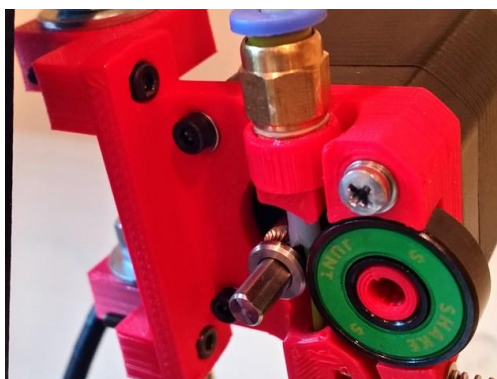


Obr. 31) Model tlačiacej hlavy Diamond Hot End.

7.5.2 Krokové motory

K privádzaniu materiálu do tlačiacej hlavy boli použité krokové motory, ktoré v rámci tlačiacej sústavy tvoria istý medzistupeň medzi hlavou a zásobníkmi. Krokové motory (každý pre jednu farbu) boli upevnené na vedenie osi Z, aby boli čo najbližšie k tlačiacej hlave. Táto poloha má veľkú výhodu v tom, že sa nenarušuje plynulosť tlače, ktorá by mohla nastať, keby sa vzdialenosť medzi krokovými motormi a hlavou neustále líšila.

Krokové motory pozostávajú z upínacej časti a z kompaktného mechanizmu, ktorý je rovnako vyrobený na 3D tlačiarňi a jeho hlavnou úlohou je posúvať materiál ďalej. [39]



Obr. 32) Mechanizmus krokového motora [39]

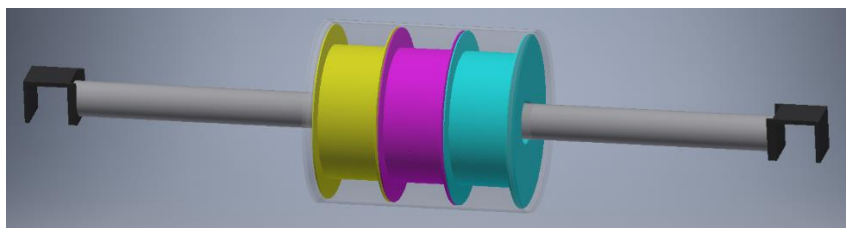
Typ zvoleného krokového motora je vo všetkých troch prípadoch rovnaký. Jeho označenie je NEMA SX17-1003LQCEF od spoločnosti Microcon. Technické parametre sú uvedené v tabuľke 18. [40]

Tab 18) Parametre krokových motorov [40]

| | |
|-------------------|---------|
| Počet fáz | 2 |
| Uhol kroku | 1,8 ° |
| Maximálne napätie | 12 V |
| Maximálny prúd | 1 A |
| Krútiaci moment | 0,3 N m |

7.5.3 Zásobník

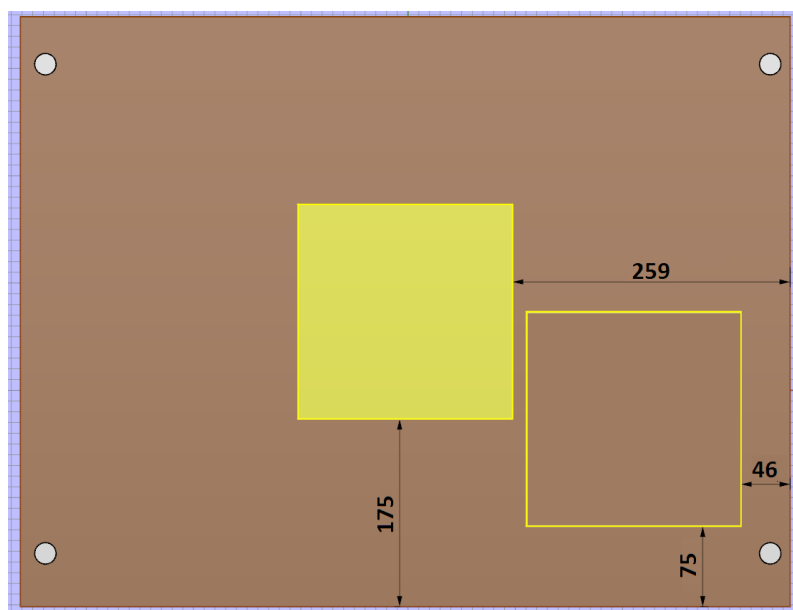
V zásobníku sú uložené tri kotúče, na ktorých je navinutý materiál. Pre široké spektrum farebných kombinácií sa najčastejšie používa trojica farieb RYB (červená, žltá a modrá) alebo CMY (azúrová, purpurová a žltá). Zásobník je umiestnený na ráme zariadenia a jeho obsah je chránený pred pôsobením vzduchu priesvitným krytom valcovitého tvaru, ktorý má z jednej strany 3 otvory pre bowdeny. Miesta, kadiaľ by mohol prechádzať vzduch sú vyplnené tesnením. Kotúče sú umiestnené na tyči s priemerom 40 mm a dĺžkou 804 mm. Zásobník je zobrazený na obrázku 33.



Obr. 33) Zásobník na materiál je priesvitný, aby bolo ľahké určiť zvyšný materiál

7.6 Vyhrievaná podložka

Z pôvodných komponentov sa na zariadení zachováva vyhrievaná podložka. Jediná úprava, ktorá sa jej týka je zmena polohy a to konkrétne smerom na stred ako je vyznačené na obrázku 34.



Obr. 34) Nová pozícia vyhrievanej podložky

7.7 Elektrovreteno

Obrábacia činnosť bude riešená pomocou elektrovretena umiestneného na jednej z osí Z. Výsledný typ elektrovretena bol zvolený na základe výpočtov rezných podmienok pri frézovaní. Od elektrovretena sa okrem toho vyžadovalo, aby dosahovalo vysokých otáčok (min. 15 000/min) a aby malo výkon primeraný k svojmu účelu, ktorým je v tomto prípade

obrábanie plastu. Za daných výsledných podmienok bolo zvolené elektrovreteno typu S4225-B40 od čínskeho výrobcu (Obr. 35). Jeho technické parametre sú uvedené v tabuľke 19.



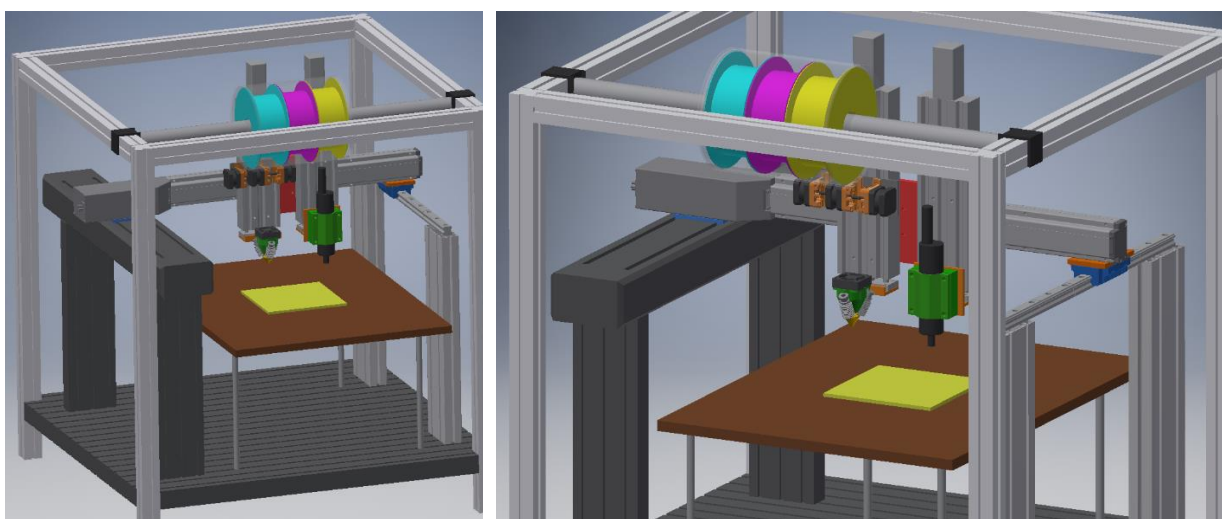
Obr. 35) Elektrovreteno zvolené pre frézovacu činnosť – typ S4225-B40 [37]

Tab 19) Vlastnosti elektrovretena podľa zdroju [37]

| Parameter | Hodnota |
|----------------------------|----------------------|
| Výkon | 250 W |
| Maximálny točivý moment | 0,08 N.m |
| Rozsah použiteľných otáčok | 5 000 – 40 000 / min |
| Napätie | 36 V |
| Prúd | 8 A |
| Hmotnosť | 0,86 kg |
| Klieštinový upínač | ER 8 |
| Chladenie | Pasívne |

7.8 Finálna podoba 3D tlačiarne

Z pridaných komponentov bol zostavený model 3D tlačiarne (Obr. 36).



Obr. 36) Model 3D tlačiarne vytvorený v Inventore

8 ELEKTRONIKA A RIADENIE

Riešenie elektroniky a celkového riadenia 3D tlačiarne vychádza z pôvodných dielov manipulátora. Jeho riadiaci systém ale neumožňuje plnenie všetkých funkcií, ktoré vyžaduje finálna podoba zariadenia a preto bude musieť byť rozšírený. Grafické znázorenie zapojenia elektroinštalácie je zobrazené na obrázku 38.

8.1 Základný hardware

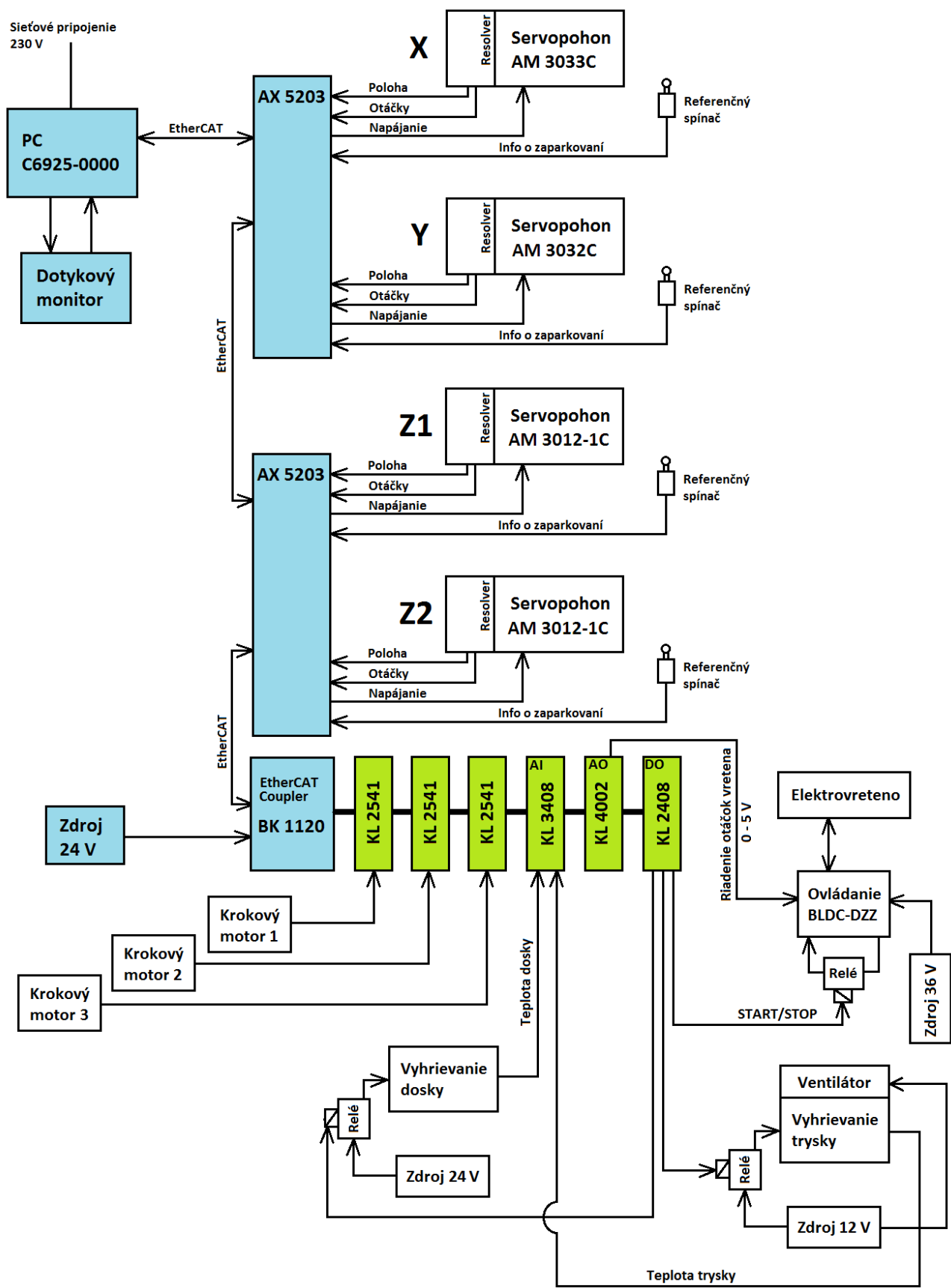
Základ riadenia celého zariadenia tvorí priemyselný počítač od Beckhoff C6925-0000 a dotykový LCD panel NEC V-Touch 1721 5U (Obr. 37). [2]

Počítač je primárne určený pre montáž do rozvádzača. Je vybavený dvoma sieťovými kartami, jedna slúži ako zbernica EtherCAT, druhá rieši prepojenie s nadradeným systémom. Čelný panel obsahuje 4 USB porty, rozhranie RS-232, DVI-I a napájací konektor. Operačný systém počítača je Windows XP Embedded. Vstavaný procesor PC je Intel Celeron 1 GHz s operačnou pamäťou 256 MB DDR. [2]

Obsluha ovláda počítač prostredníctvom dotykovej obrazovky, ktorá nahrádza klávesnicu a myš. Obrazkovka je prepojená s počítačom cez rozhranie DVI (obraz) a USB, ktoré prenáša signál od užívateľa. [2]



Obr. 37) Vľavo na obrázku je znázornený PC Beckhoff C6925-0000, vpravo dotykový panel NEC V-Touch 1721 5U [1], [2]



Obr. 38) Bloková schéma zapojenia

8.2 Servo drivery

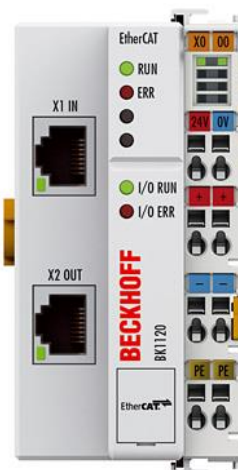
K správnemu chodu všetkých 4 osí sú použité dva servo drivery AX 5203 od Beckhoff (Obr 39). Ich veľkou výhodou je široká kompatibilita s rôznymi typmi pohonov a možnosť zapojenia až dvoch kanálov na jeden driver, čím sa znižujú náklady na kúpu. Drivery zabezpečujú v reálnom čase kontrolu nad polohou, rýchlosťou a akceleráciou všetkých servomotorov. [1]



Obr. 39) Servo driver AX 5203 od Beckhoff [1]

8.3 EtherCAT Bus Coupler

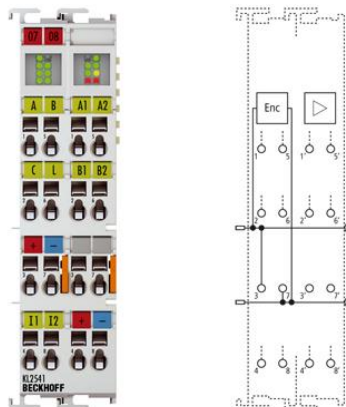
Prepojenie počítača s jednotlivými terminálmi sa realizuje cez modul EtherCAT Bus Coupler BK1120, ktorý rovnako ako PC a obrazovka patrí k pôvodným dielom manipulátora. Táto elektronická súčiastka (Obr. 40) prepojuje 1 až 64 kariet typu K-Bus, ktoré zahŕňajú rôzne digitálne a analógové vstupy/výstupy. K prepojeniu všetkých elektronických komponentov na zariadení bolo využitých celkovo 6 kariet (3x KL 2541, 1x KL 2408, 1x KL 3408 a 1x KL 4002). [1], [19]



Obr. 40) EtherCAT Bus Coupler [1]

8.3.1 Terminál KL 2541

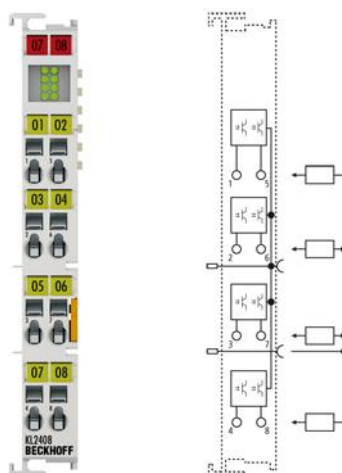
Terminál KL 2541 má na starosti ovládanie krokových motorov. Je určený pre motory stredných výkonov, pretože zahŕňa širokú škálu napätí a prúdov (Obr. 41). [1]



Obr. 41) Karta KL 2541 od Beckhoff [1]

8.3.2 Terminál KL 2408

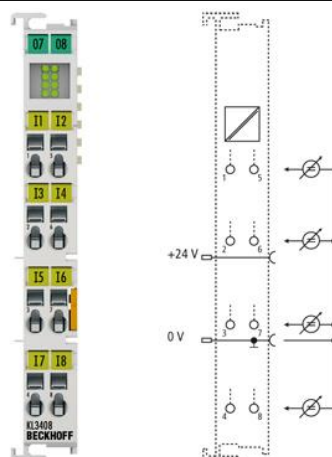
Pomocou karty digitálnych výstupov sa vykonávajú ohrievania stavebnej dosky a tlačiacej hlavy a k tomu sa spína jednotka BLDC-DZZ. Karta je na obrázku 42.



Obr. 42) Karta KL 2048 od Beckhoff [1]

8.3.3 Terminál KL 3408

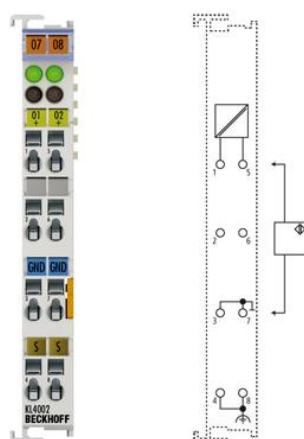
Táto karta zoskupuje analógové vstupy, ktoré sú potrebné v tomto prípade na vyhodnotenie momentálnej teploty vyhrievanej podložky a trysky (Obr. 43). [1]



Obr. 43) Karta KL 3408 od Beckhoff [1]

8.3.4 Terminál KL 4002

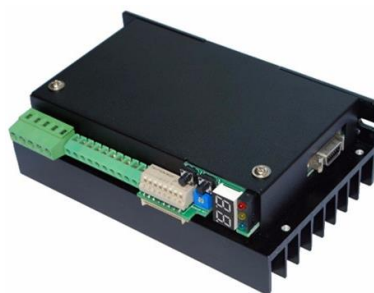
Posledný typ použitej karty je karta analógových výstupov, ktorá reguluje otáčky elektrovretena. Je zobrazená na obrázku 44.



Obr. 44) Karta KL 4002 od Beckhoff [1]

8.4 Ovládanie elektrovretena BLDC-DZZ

Ovládacia jednotka BLDC-DZZ je určená priamo k ovládaniu elektrovretena. Pracuje s napätím 36 V a okrem regulácie otáčok je vybavená funkciou na monitorovanie teploty vretena. Je dostupná v balení s elektrovretenom (Obr. 45). [37]



Obr. 45) Ovládacia jednotka BLDC-DZZ [37]

8.5 Výkon zdrojov

Pri navrhovaní riadenia je potrebné vypočítať hodnoty výkonov všetkých zdrojov, ktoré niečo napájajú. Podľa minimálnej hodnoty sa totiž určuje, koľko wattový zdroj sa musí zaobstarať.

Výkon zdroja potrebný pre elektrovreteno:

$$P_E = 3 \cdot U \cdot I = 3 \cdot 36 \text{ V} \cdot 8 \text{ A} = 864 \text{ W} \quad (119)$$

Výkon zdroja potrebný pre vyhrievanú dosku:

$$P_D = 3 \cdot U \cdot I = 3 \cdot 24 \text{ V} \cdot 6,6 \text{ A} = 475,2 \text{ W} \quad (120)$$

Výkon zdroja potrebný pre vyhrievanie trysky a ventilátora:

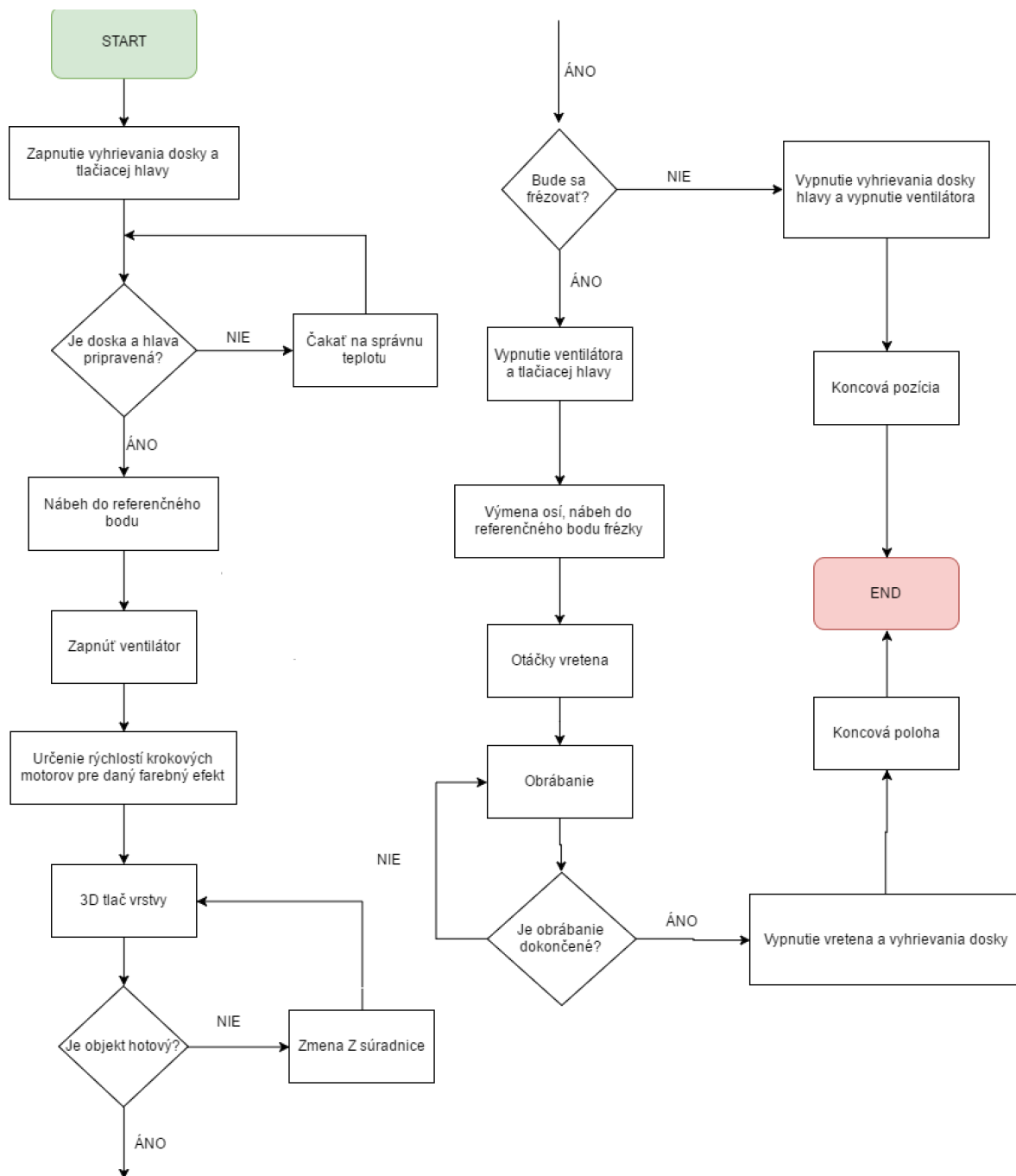
$$P_T = 3 \cdot U \cdot I = 3 \cdot 12 \text{ V} \cdot (0,145 \text{ A} + 3,3 \text{ A}) = 124 \text{ W} \quad (121)$$

Výkon zdroja potrebný pre modul EtherCAT Bus Coupler a všetky terminály:

$$P_C = 3 \cdot U \cdot I = 3 \cdot 24 \text{ V} \cdot (3 \text{ A} + 0,14 \text{ A} + 0,1 \text{ A} + 0,075 \text{ A} + 0,018 \text{ A}) \\ = 240 \text{ W} \quad (122)$$

8.6 Software pre riadenie

V prípade riadenia platí, že o koľko sa rozšíril hardware, o toľko sa musí aj software. Riadenie manipulátora vychádza z pôvodného, ktoré už bolo navrhnuté pre úplne prvú prestavbu. Program sa teda rozšíri o ďalšie prvky, ktoré musia byť nejakým spôsobom ovládané. Návrhom riadenia procesu sa zaoberá nasledujúci vývojový diagram (Obr. 46), ktorý slúži k znázorneniu jednotlivých krokov výrobného procesu.



Obr. 46) Vývojový diagram

9 ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo vytvorenie návrhu na rozšírenie manipulátora, ktorý je v súčasnosti využívaný na 3D tlač. Rozšírenie sa zaoberalo vylepšením tlačiacej hlavy, ktorá by bola schopná pri tlači súčasne používať až tri druhy materiálov a zároveň prepojením tlačiacej funkcie zariadenia s obrábacou funkciou, ktorá má za úlohu zlepšiť povrchové vlastnosti vytlačeného objektu.

Týmto špecifickými požiadavkami sa venovala teoretická časť práce, ktorá zhrnula súčasný stav poznatkov o multimateriálových tlačiacich hlavách a hybridných 3D tlačiarňach, ktoré spájajú viacero výrobných procesov. Podľa dostupných informácií bolo vypracovaných niekoľko návrhov, ktoré ponúkli praktické riešenia tejto problematiky.

Systémovou analýzou bol vybratý najvhodnejší koncept na prestavbu. Aby sa mohla prestavba považovať za prakticky realizovateľnú, bolo nutné tento koncept otestovať pevnostnými, statickými a dynamickými výpočtami. Na základe týchto výpočtov bolo rozhodnuté, ktoré komponenty pôvodného zariadenia môžu zostať zachované a ktoré musia byť nahradené.

Konečná podoba nového zariadenia je vybavená dvoma osami Z, z ktorých je práve jedna využívaná na 3D tlač a druhá na frézovanie (obrábaciú činnosť). Výrobný proces je prispôbený tak, aby v istom okamžiku výroby bola len jedna z osí aktívna.

Tlačiacia funkcia zariadenia je založená na špeciálnej tlačiackej hlave Diamond Hot end, ktorá disponovala najlepšimi výrobnými vlastnosťami spomedzi ostatných. Jej prednosťou je hlavne rýchlosť zmeny farby a schopnosť šetrenia materiálu. Na frézovaciú činnosť bolo zvolené elektrovreteno s vysokými otáčkami a ideálnymi rozmermi pre takéto hybridné zariadenie.

Výsledné konštrukčné riešenie bolo spracované do 3D modelu. Výkresy kľúčových súčiastok spolu s výkresom zostavy sú uvedené v prílohe.

Prestavba 3D tlačiarne zahŕňa aj rozšírenie pôvodného riadiaceho procesu. Aby všetky komponenty správne spolupracovali, musí byť rozšírený hardware a zároveň i software. Hardware bol rozšírený o servomenič a niekoľko terminálov na komunikáciu so všetkými pridanými prvkami. Rozšírenie softwaru bolo navrhnuté vývojovým diagramom, ktorý simuluje výrobný proces.

10 ZUSAMMENFASSUNG

Die Aufgabe dieser Arbeit bestand darin, der Ausbau- und Erweiterungsentwurf eines 3D-Druckers herzustellen. Die Erweiterung beinhaltet die Verbesserung 3D-Druckkopfes für die Kombination von verschiedenen Druckmaterialien sowie Multicolorextrusion. Des Weiteres soll das Gerät mit einer Bearbeitungsspindel für das Fräsen erweitert werden, mit dem Ziel die Oberfläche der 3D-gedruckten Bauteile zu verbessern.

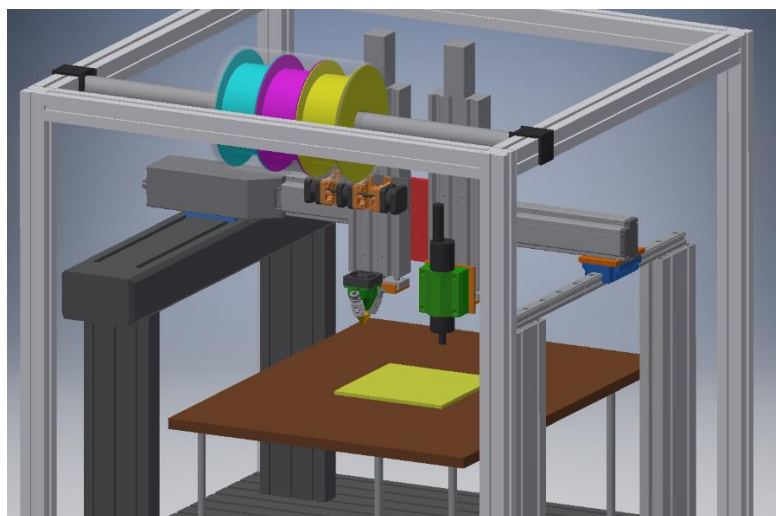
Im theoretischen Teil (Kapitel 3) wurde der Leser mit möglichen 3D-Druckköpfe, die sich auf Multicolorextrusion spezialisieren, bekannt gemacht, wie auch mit den Hybrid-3D-Drucker, die auf ein Gerät mehrere Erzeugungsprozesse. Nach dieser Recherche und der Ermittlung der Anforderungskriterien im Kapitel 4, wurden im Kapitel 5 vier Erweiterungsvariante ausgearbeitet. Mit der Hilfe von Systemanalyse wurde die passendste Variante ausgewählt.

Damit der Ausbau realisieren könnte, wurde im Kapitel 6 ausgewählte Variante mit den Steifigkeit- und Festigkeitsberechnungen sowie einzelnen Antriebsberechnungen geprüft. Auf der Basis von den Prüfungen wurden ausreichenden und unzureichenden Komponenten für der Ausbau voneinander aufgetrennt. Die Ergebnisvariante sollte mit zwei Z-Achse Linearführungen (eine mit dem 3D-Druckkopf und die andere mit der Frässpindel) ausgestattet werden. Während des Fertigungsprozess arbeitet aber nur eine Z-Achse und die andere wartet darauf, wann die erste Z-Achse nicht mehr aktiv ist.

Folgendes Kapitel befasst sich mit allen Erweiterungskomponenten, die neuer 3D-Drucker nach des Ausbau beinhalten sollte. Ausgewählter 3D-Druckkopf ist Diamond Hot End, der mit den besten Druckeignungen gewonnen hat. Der größte Vorteil ist schneller Farbwechsel und Materialökonomie. Für Fräsen wurde Elektroschneidspindel ausgewählt. Es behaltet mit höher Spindeldrehzahl und ideales Maß für solche Hybrid-3D-Drucker.

Die Erweiterungsvariante wurde mit dem 3D Modell hergestellt und auf technische Zusammenbauzeichnung, sowie Einzelteilzeichnungen erstellt. Entwurf eines Schematas für die Steuerung und Schaltung wurde auch erstellt.

Die Ergebnisvariante ist auf dem Bild 47 dargestellt.



Obr. 47) Erweitert 3D-Drucker

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BECKHOFF AUTOMATION GMBH. Beckhoff Information system [online]. 2014 [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://infosys.beckhoff.com/english/>
- [2] BOSÁK, D. 3D gravírovací frézka. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Bradáč, Ph.D.
- [3] Princíp technológie 3D tlače. *3Dprinting* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>
- [4] Prusa i3. *Prusa 3D* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.prusaprinters.org/original-prusa-i3-mk2-multi-material-upgrade-release/>
- [5] SMC INDUSTRIAL AUTOMATION CZ S.R.O. SMC Czech Republic: Competence In Automation [online]. 2014 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.smc.cz/>
- [6] História 3D tlače. *Allthat3d* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.allthat3d.com/3d-printing-history/>
- [7] História 3D tlače. *Sculpteo* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>
- [8] Budúcnosť 3D tlače. *Openfabrication* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.openfabrication.org/>
- [9] 3D Printing Infographic. *Troweprice* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: https://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D_Printing_Infographic_FINAL.pdf
- [10] Auto Urbee 2. *Korecologic* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://korecologic.com/>
- [11] Výroba prototypov 3D tlačou. *Autoroad* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://f1news.autoroad.cz/technika/45427-rychla-vyroba-prototypu-klic-k-intenzivnim-aerodynamickym-programum-v-f1-video>
- [12] SCHOULA, Š. Konstrukční návrh 3D tiskárny. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Bradáč, Ph.D.
- [13] Farebná 3D tlač. *Richrap* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://richrap.com/?p=121>
- [14] Rapid prototyping. *3dtech* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.3dtech.cz/rapid-prototyping/>
- [15] Prvá vytlačená sánka. *Newsmedical* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.news-medical.net/news/20120207/Worlds-first-3D-printed-jaw-transplant.aspx>
- [16] Kovové zubné implantáty. *3d-tisk* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/renishaw-am250-metal-tiskne-zubni-implantaty/>
- [17] Wohlers report. *Wohlersassociates* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://wohlersassociates.com/index.html>
- [18] Nevýhody 3D tlače. *Stratnel* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://stratnel.com/2016/08/04/7-situations-where-subtractive-manufacturing-edges-out-3d-printing/>

- HALAMÍČEK, L. Návrh rozšíření 3D frézky na 3D tiskárnu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 48s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Bradáč, Ph.D.
- [19] 3D tlač pre zubných technikov. *Whipmix* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://info.whipmix.com/understanding-3d-printing-for-dental-professionals>
- [20] Laser Cladding. *Oerlikon* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/coating-equipment-laser-cladding/laser-cladding-processes/>
- [21] Japonské 5-osé výrobné centrum. *3dprint* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://3dprint.com/132475/5-axis-3d-printer-japan/>
- [22] Diamond Hot End. *Reprap* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend
- [23] Využitie PLA. *Lego* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://lego.wikia.com/wiki/Acrylonitrile_Butadiene_Styrene
- [24] Original Prusa i3 mk2. *Prusa3d* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/59-original-prusa-i3-mk2-kit.html>
- [25] Prometheus. *Kickstarter* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.kickstarter.com/projects/811909269/the-prometheus-system-intuitive-multi-filament-3d?token=7d9207f0>
- [26] Rast tržieb 3D tlače. *Forbes* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.forbes.com/sites/tjmccue/2016/04/25/wohlers-report-2016-3d-printer-industry-surpassed-5-1-billion/#4b35ce407cb1>
- [27] ZMorph3d. *ZMorph3d* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://store.zmorph3d.com/produkt/zmorph-2-0-sx-printing-set/>
- [28] PowerWASP. *Personalfab* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.personalfab.it/en/products/powerwasp-cnc-mill-lcdsddis/>
- [29] Technická fréza valcová. *ATA* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.loziska-naradie.sk/e-253-freza-technicka-d6-sb-1ml-sek3>
- [30] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [31] VEČEŘ, P. Konstrukční návrh malé modelářské CNC frézky, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016, 74 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pavlík, Ph.D.
- [32] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2, přeprac., rozš. Praha: MM publishing, 2010. 420 s. ISBN 978-80-254-7980-3.
- [33] Vol'ba servomotorov. *Beckhoff* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: https://download.beckhoff.com/download/document/motion/am3000_am3500_ba_en.pdf
- [34] Vol'ba lineárneho vedenia. *Hiwin* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.hiwin.cz/cz/produkty/linearni-vedeni/kulickove-vedeni/rada-hg>
- [35] Vol'ba hliníkového profilu. *AlutecKK* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.aluteckk.cz>
- [36] Nakupovaná súčiastka elektrovreteno. *Aliexpress* [online]. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/250w-40000rpm-ER8-Brushless-spindle-motor-MACH3-driver-DC36V-for-CNC-drilling-milling-carving-kits/32757165445.html?spm=2114.10010108.1000015.1.Ch8Egl&s=p>
- [37]

- [38] Diamond Hot End. *Reprap* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://reprap.org/wiki/Diamond_Hotend
- [39] Model Diamond Hot End. *Thingiverse* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.thingiverse.com/thing:835542>
- [40] Krokové motory. *Microcon* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://www.microcon.cz/pdf2015/katalog_092015.pdf
- [41] Voľba ventilátoru. *Farnell* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://uk.farnell.com/multicomp/mc35357/fan-50x50x15mm-12vdc/dp/1826913>

12 ZOZNAM SKRATIEK, SYMBOLOV, OBRÁZKOV A TABULIEK

12.1 Zoznam tabuliek

| | |
|---|----|
| TAB 1) ZÁKLADNÉ VLASTNOSTI MATERIÁLOV POUŽÍVANÝCH PRE 3D TLAČ..... | 25 |
| TAB 2) POUŽITÉ POSUVOVÉ OSI A ICH PARAMETRY [2], [5] | 32 |
| TAB 3) PARAMETRE SERVOMOTOROV [1], [2]..... | 32 |
| TAB 4) TECHNICKÉ ÚDAJE K SÚČASTIAM TLAČIACEJ HLAVY [19] | 33 |
| TAB 5) SYSTÉMOVÁ ANALÝZA PRE URČENIE KONŠTRUKČNÉHO USPORIADANIA..... | 39 |
| TAB 6) ZHRNUTIE ZVOLENÝCH FRÉZOVAČÍCH PARAMETROV | 42 |
| TAB 7) PARAMETRY PRE KONTROLU POHONU POSUVOVEJ SÚSTAVY OSI Z | 43 |
| TAB 8) VEĽKOSTI MOMENTOV ZOTRVAČNOSTI KOMPONENTOV OSI Z45 | |
| TAB 9) PARAMETRY PRE KONTROLU POHONU PÔVODNEJ POSUVOVEJ SÚSTAVY OSI Y | 48 |
| TAB 10) VEĽKOSTI MOMENTOV ZOTRVAČNOSTI KOMPONENTOV OSI Y50 | |
| TAB 11) PARAMETRY PRE KONTROLU POHONU NOVEJ POSUVOVEJ SÚSTAVY OSI Y..... | 51 |
| TAB 12) VEĽKOSTI MOMENTOV ZOTRVAČNOSTI KOMPONENTOV OSI Y53 | |
| TAB 13) VELIČINY PRE VÝPOČET MOMENTOV PRE VEDENIE V OSI Y.. | 55 |
| TAB 14) POROVNÁVANIE VYPOČÍTANÝCH A MAXIMÁLNYCH HODNÔT DANÝCH VELIČÍN | 56 |
| TAB 15) PARAMETRY PRE KONTROLU POHONU POSUVOVEJ SÚSTAVY OSI X | 56 |
| TAB 16) VEĽKOSTI MOMENTOV ZOTRVAČNOSTI KOMPONENTOV OSI X58 | |
| TAB 17) VELIČINY PRE VÝPOČET MOMENTOV PRE VEDENIE V OSI Y .. | 60 |
| TAB 18) PARAMETRE KROKOVÝCH MOTOROV [40] | 64 |
| TAB 19) VLASTNOSTI ELEKTROVRETENA PODĽA ZDROJU [37] | 66 |

12.2 Zoznam obrázkov

| | |
|---|----|
| OBR. 1) NA OBRÁZKOCH SÚ ZNÁZORNENÉ A) OVLÁDACIE LIETADLO [9]; B) AUTO URBEE [10] A C) MODEL SÁNKY [15]. VŠETKY TIETO PREDMETY BOLI VYTVORENÉ POMOCOU 3D TLAČIARNÍ. | 18 |
| OBR. 2) GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE NÁRASTU TRŽIEB 3D TLAČE VO SVETE [17] | 19 |

| | |
|---|-----------|
| OBR. 3) POROVNANIE DVOCH KONŠTRUKČNÝCH VARIÁCIÍ SLA TECHNOLOGIE. VĽAVO JE ZOBRAZENÁ BEŽNÁ VARIANTA A VPRAVO JE VARIANTA S DLP PROJEKTOROM. [20]..... | 21 |
| OBR. 4) GRAFICKÉ ZNÁZORNENIE VÝROBNÉHO PROCESU PRI TECHNOLOGII SLS. VĽAVO JE VIDIEŤ NANÁŠANIE PRÁŠKU DO SPEKACIEHO PRIESTORU A VPRAVO JE ZOBRAZENÝ SAMOTNÝ SPEKACÍ PROCES. [3]..... | 22 |
| OBR. 5) METÓDA 3D LASER CLADDING [21] | 23 |
| OBR. 6) 3D TLAČIAREŇ S TECHNOLOGIOU FDM. [11] | 23 |
| OBR. 7) VIZUÁLNE POROVNANIE VYBRANÝCH MATERIÁLOV NA ROVNAKOM OBJEKTE. [25] | 25 |
| OBR. 8) PRUSA I3 MK2 - DUAL/QUAD EXTRUSION VYLEPŠENIE; A) CELKOVÝ POHĽAD NA 3D TLAČIAREŇ; B) POHĽAD NA ZÁSOBNÍKY MATERIÁLU; C) MODEL LIETADLA VYROBENÝ NA TEJTO 3D TLAČIARNI [4] | 27 |
| OBR. 9) PROMETHEUS SYSTÉM JE ZLOŽENÝ ZO SAMOSTATNÝCH DIELOV: A) 2 EXTRUDERY, FEEDER A HOT END; B) VÝSLEDNÉ PRODUKTY VYROBENÉ POMOCOU TÝCHTO VYLEPŠUJÚCICH DIELOV. [26] | 27 |
| OBR. 10) DIAMOND HOT END TRYSKA S JEJ PRODUKTAMI [23]..... | 28 |
| OBR. 11) A) UPRAVENÁ TLAČIACA HLAVA; B) JEJ VÝROBOK [13]..... | 28 |
| OBR. 12) ENOMOTO 5-AXIS 3D PRINTER [22]..... | 29 |
| OBR. 13) ZMORPH 2.0 SX [28]..... | 30 |
| OBR. 14) POWERWASP EVO [29] | 30 |
| OBR. 15) POHĽAD NA RÁM, PRACOVNÝ STÔL A LINEÁRNE VEDENIA MANIPULÁTORA | 31 |
| OBR. 16) TLAČIACA HLAVA MK8. [19] | 33 |
| OBR. 17) DETAILNÝ POHĽAD NA DRUHÚ PRESTAVBU 3D TLAČIARNE...34 | 34 |
| OBR. 18) VARIANTA A - MODEL 3D TLAČIARNE S REVOLVEROVOU HLAVOU..... | 35 |
| OBR. 19) VARIANTA B - MODEL 3D TLAČIARNE S AUTOMATICKOU VÝMENOU NÁSTROJOV POMOCOU ZÁSOBNÍKU NA NÁSTROJE | 36 |
| OBR. 20) VARIANTA C - MANIPULÁTOR PRACUJE S DVOMA OSAMI Z, KTORÉ VYKONÁVAJÚ SPOLOČNÝ POHYB PO LINEÁRNYM VEDENÍ. ZÁROVEŇ UMOŽŇUJÚ UPNUTIE KROKOVÝCH MOTOROV..... | 37 |
| OBR. 21) VARIANTA D –DVOJITÉ VEDENIE OSI X A Z..... | 37 |
| OBR. 22) VALCOVÁ TECHNICKÁ FRÉZA, KTORÁ JE POUŽITÁ PRE VÝPOČET REZNEJ SILY [30] | 41 |
| OBR. 23) SCHÉMA POSUVOVÉHO SYSTÉMU V OSI Z..... | 43 |
| OBR. 24) SILOVÉ PÔSOBNIE NA VEDENIE OSI Z | 46 |
| OBR. 25) SCHÉMA POSUVOVÉHO SYSTÉMU V OSI Y [32]..... | 47 |

| | |
|--|----|
| OBR. 26) LINEÁRNE VEDENIE S GULIČKOVÝM ŠRÓBOM OD SMC, TYP LEFS32S7A-500B-S2 [5]..... | 51 |
| OBR. 27) SILY PÔSOBIACE NA LINEÁRNE VEDENIE..... | 55 |
| OBR. 28) SCHÉMA POSUVOVÉHO SYSTÉMU V OSI X [32]..... | 56 |
| OBR. 29) SILY PÔSOBIACE NA LINEÁRNE VEDENIE..... | 60 |
| OBR. 30) LINEÁRNE GULIČKOVÉ VEDENIE RADY HG OD HIWIN [35]..... | 62 |
| OBR. 31) MODEL TLAČIACEJ HLAVY DIAMOND HOT END..... | 64 |
| OBR. 32) MECHANIZMUS KROKOVÉHO MOTORA [39] | 64 |
| OBR. 33) ZÁSOBNÍK NA MATERIÁL JE PRIESVITNÝ, ABY BOLO LAHKÉ URČIŤ ZVÝŠNÝ MATERIÁL..... | 65 |
| OBR. 34) NOVÁ POZÍCIA VYHRIEVANEJ PODLOŽKY..... | 65 |
| OBR. 35) ELEKTROVRETENO ZVOLENÉ PRE FRÉZOVACIU ČINNOSŤ – TYP S4225-B40 [37] | 66 |
| OBR. 36) MODEL 3D TLAČIARNE VYTVORENÝ V INVENTORE..... | 66 |
| OBR. 37) VĽAVO NA OBRÁZKU JE ZNÁZORNENÝ PC BECKHOFF C6925-0000, VPRAVO DOTYKOVÝ PANEL NEC V-TOUCH 1721 5U [1], [2] | 67 |
| OBR. 38) BLOKOVÁ SCHÉMA ZAPOJENIA..... | 68 |
| OBR. 39) SERVO DRIVER AX 5203 OD BECKHOFF [1] | 69 |
| OBR. 40) ETHERCAT BUS COUPLER [1] | 69 |
| OBR. 41) KARTA KL 2541 OD BECKHOFF [1] | 70 |
| OBR. 42) KARTA KL 2048 OD BECKHOFF [1] | 70 |
| OBR. 43) KARTA KL 3408 OD BECKHOFF [1] | 71 |
| OBR. 44) KARTA KL 4002 OD BECKHOFF [1] | 71 |
| OBR. 45) OVLÁDACIA JEDNOTKA BLDC-DZZ [37] | 71 |
| OBR. 46) VÝVOJOVÝ DIAGRAM..... | 73 |
| OBR. 47) ERWEITERT 3D-DRUCKER..... | 75 |

12.3 Zoznam použitých skratiek a symbolov

| | | |
|------------|----------------------|------------------------|
| D_n | [mm] | Priemer nástroja |
| Z_n | [-] | Počet zubov |
| v_f | [m/min] | Rýchlosť posuvu |
| a_p | [mm] | Hĺbka záberu |
| a_e | [mm] | Šírka záberu |
| n | [min ⁻¹] | Otáčky vretena |
| γ_o | [°] | Ortogonálny uhol čela |
| κ_n | [°] | Uhol nastavenia ostria |

| | | |
|-----------------|-----------------------|---|
| k_{c1} | [N/mm ²] | Merná rezná sila |
| m_c | [-] | Nárast mernej reznej sily |
| m_{vr} | [kg] | Hmotnosť elektrovretena s upnutím |
| g | [m/s ²] | Gravitačné zrýchlenie |
| d_{0s} | [m] | Menovitý priemer guľčkového šróbu |
| d_k | [m] | Malý priemer závitú guľčkového šróbu |
| s | [m] | Stúpanie guľčkového šróbu |
| C_s | [N] | Statická tuhosť guľčkového šróbu |
| C_d | [N] | Dynamická tuhosť guľčkového šróbu |
| k_{zo} | [-] | Koeficient v závislosti na uložení pre otáčky |
| k_{zv} | [-] | Koeficient v závislosti na uložení pre vzper |
| α_z | [°] | Uhol sklonu vedenia |
| η_v | [-] | Účinnosť valivého vedenia |
| η_s | [-] | Účinnosť KŠM |
| η_{Lz} | [-] | Účinnosť ložísk KŠM |
| f_1 | [-] | Súčiniteľ trenia vo vodiacích plochách valivého vedenia |
| f_2 | [-] | Ekvivalentný súčiniteľ trenia v KŠM redukovaný na polomer šróbu |
| $i = 1$ | [-] | Prevodový pomer |
| v_{maxz} | [m/s] | Maximálna rýchlosť posuvu |
| F_{Cf} | [N] | Rezná sila pri frézovaní |
| l_d | [m] | Vzdialenosť medzi ložiskami |
| t | [s] | Čas potrebný na rozbeh na rýchlosť posuvu |
| v_c | [mm/min] | Rezná rýchlosť |
| f_z | [mm] | Posuv na zub |
| h_m | [mm] | Stredná hrúbka triesky pri frézovaní |
| k_{cf} | [MPa] | Merná rezná sila pri frézovaní |
| M_{Kf} | [N.m] | Točivý moment na nástroji pri frézovaní |
| P_f | [W] | Výkon vretena pri frézovaní |
| n_s | [min ⁻¹] | Otáčky guľčkového šróbu pri posuve |
| ε_s | [rad/s ²] | Požadované uhlové zrýchlenie guľčkového šróbu a motoru zároveň |
| n_{max} | [min ⁻¹] | Maximálne dovolené prevádzkové otáčky |
| F_k | [N] | Prípustné axiálne zaťaženie guľčkového šróbu |
| F_{kmax} | [N] | Maximálne prípustné zaťaženie šróbu v pracovných podmienkach |
| L | [min ⁻¹] | Životnosť guľčkového šróbu v otáčkach |
| L_h | [hod] | Životnosť guľčkového šróbu v hodinách |
| η_c | [-] | Celková účinnosť |
| M_S | [N.m] | Minimálny potrebný moment pre pohon osi podľa statického hľadiska |
| $a_{x,y,z}$ | [m/s ²] | Lineárne zrýchlenie osi |
| n_k | [min ⁻¹] | Kritické otáčky guľčkového šróbu |
| J_{mot} | [kg.m ²] | Moment zotrvačnosti motora |
| J_b | [kg.m ²] | Moment zotrvačnosti brzdy motora |
| J_s | [kg.m ²] | Moment zotrvačnosti guľčkového šróbu |

| | | |
|-----------------|----------------------|---|
| J_{mz} | [kg.m ²] | Redukovaný moment zotrvačnosti posuvových hmôt |
| J_{rhm} | [kg.m ²] | Celkový moment zotrvačnosti redukovaný na hriadeľ motora |
| F_P | [N] | Predpnutie guľčkového šróbu |
| M_G | [N.m] | Moment zaťaženia spôsobený gravitáciou presúvaných hmôt |
| M_{GT} | [N.m] | Stratový moment spôsobený odporom v vedení gravitáciou presúvaných hmôt |
| $M_{K\dot{S}M}$ | [N.m] | Stratový moment pasívnych odporov spôsobený odporom v guľčkovom šróbe |
| M_{CRz} | [N.m] | Celkový moment záťaže redukovaný na hriadeľ motora |
| $M_{Kdynmin}$ | [N.m] | Potrebný minimálny moment motora z dynamického pohľadu |
| $q_{1, 2, 3}$ | [m] | Vzdialenosť vychádzajúca z obrázku |
| F_E | [N] | Sila spôsobená gravitáciou elektrovretena |
| M_X | [N.m] | Klopňý moment k osi X |
| M_Y | [N.m] | Klopňý moment k osi Y |
| M_Z | [N.m] | Klopňý moment k osi Z |
| F_{BZ} | [N] | Radiálna sila pôsobiaca na pravé vedenie |
| F_{AZ} | [N] | Radiálna sila pôsobiaca na ľavé vedenie |
| F_{BY} | [N] | Dotyčnicová sila pôsobiaca na pravú stranu |
| F_{AY} | [N] | Dotyčnicová sila pôsobiaca na ľavú stranu |
| P_E | [W] | Výkon zdroja potrebný pre elektrovreteno |
| P_D | [W] | Výkon zdroja potrebný pre vyhrievanú dosku |
| P_T | [W] | Výkon zdroja potrebný pre vyhrievanie trysky a ventilátora |
| P_C | [W] | Výkon zdroja potrebný pre modul EtherCAT Bus Coupler a všetky terminály |

13 ZOZNAM PRÍLOH

CD s modelmi z Inventoru

Výkresová dokumentácia:

| | |
|--------------------------|------------------|
| Držiak vretena 1 | Výkres súčiastky |
| Držiak vretena 2 | Výkres súčiastky |
| Chladič | Výkres súčiastky |
| Časť extruderu | Výkres súčiastky |
| Extruder | Výkres súčiastky |
| Kryt zásobníku | Výkres súčiastky |
| Príruba | Výkres súčiastky |
| Tryska | Výkres súčiastky |
| Upínač elektrovretena | Výkres súčiastky |
| Upínač extruderov | Výkres súčiastky |
| Upínanie tlačiacej hlavy | Výkres súčiastky |
| Upínanie vedení Z | Výkres súčiastky |
| Upínanie zásobníku | Výkres súčiastky |
| Držiak tlačiacej hlavy | Výkres súčiastky |
| Zostava manipulátora | Výkres zostavy |

PRÍLOHY